EX LIBRIS DAVIDIS EUGENII SMITH

SIDEREVS NVNCIVS

MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, ſuſpiciendaque proponens
vnicuique, præſertim verò
PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, quæ à
GALILEO GALILEO
1609 - 1610

GALILEE LE RETOUR

2009 - 2010

VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M D C X.
Superiorum Permiſſu, & Priuilegio.

Olympiades de Physiques - Lycée Louis le Grand
Philippine AZADIAN - Natalie COLLINS - Léa FUCHS - Emma LAPABE - Léa LENGLART

EPPUR SI MUOVE

«ET POURTANT, ELLE TOURNE!»

Galilée

SOMMAIRE

Introduction Page 4

I Galilée, le messager des étoiles Page 5

II La lunette astronomique Page 7

1- Historique Page 7
2- Fonctionnement Page 8
3- Matériaux et Construction Page 9

III Découvertes Page 10

1- Jupiter et ses satellites
A- Découverte
B- Les éclipses
C- Table des satellites de Jupiter
D- Les satellites de Jupiter aujourd'hui
2- La lune Page 18
A- Historique
B- Comment Galilée a-t-il calculé la hauteur des montagnes lunaires ?
C- Bilan
3- Les phases de Vénus Page 21
A- Les observations de l'étoile du berger
B- Une remise en cause du système de Ptolémée
C- Calculs complémentaires
4- Les tâches solaires Page 28
A- Observations par projection
B- Querelle entre Scheiner et Galilée
C- Conséquences de cette découverte sur les esprits et sur l'avancée de l'astronomie
5- Saturne, l'erreur de Galilée Page 34

Conclusion Page 38

Bibliographie Page 39

Il y a exactement 400 ans, l'astronome italien Galileo Galilei pointa sa lunette astronomique vers le ciel et commença a découvrir les merveilles et les mystères de l'univers. Il observa pour la première fois les cratères de la Lune et le ballet des satellites de Jupiter, sans oublier la surface solaire ou les merveilles des phases de Vénus. Galilée est un personnage central dans l'histoire non seulement de la physique mais de toute la culture européenne, c'est la raison pour laquelle nous nous sommes intéressées à ses incroyables découvertes. En effet, en l'honneur des 400 ans de ses observations et d'une année sous le signe de l'astronomie, nous avons décidé de nous pencher sur ce grand homme pour notre travail des Olympiades. Ce fut un travail très enrichissant, à la fois sur le plan scientifique, car il nous a permis d'ouvrir notre champ de connaissance à une matière peut abordée au lycée : l'astronomie, que sur le plan personnel, grâce au travail en groupe.

Notre dossier a donc pour but d'expliquer les observations de Galilée et à quel point celles-ci ont été à l'origine d'une révolution scientifique. Nous avons aussi travaillé à la fabrication d'une lunette astronomique afin de refaire les observations de l'illustre scientifique.

Au carrefour de plusieurs domaines comme les sciences physiques et mathématiques mais aussi la philosophie et la théologie, Galilée nous propose une vision unique d'un monde où l'unité du savoir règnerait autour de l'héliocentrisme. Sa passion pour les sciences qu'il souhaite désespérément partager avec le monde est ce qui rend cet homme une sorte de martyr pour la libre pensée et pour une nouvelle conception du monde.

Ce travail n'aura été possible sans le dévouement et l'aide de notre professeur de Physique-Chimie, M.Faye, que nous voulons remercier. De plus, nous joignons nos remerciements à M. Patrice Mottini, architecte, qui nous a aidé à construire notre propre lunette astronomique. Et enfin, nous remercions M.. Michel Combes, directeur honoraire de l'Observatoire de Paris, pour ses précieux conseils et son aide.

I. GALILEE, LE MESSAGER DES ÉTOILES

Né à Pise le 15 février 1564, Galileo Galilei est le fils aîné de Vincenzio Galilei, qui joue un rôle non négligeable dans la première éducation du scientifique : il est cultivé, musicien et auteur d'ouvrages de théorie musicale, qui accordent une grande importance aux mathématiques et deviendront la passion de son fils. Galilée apprend les bases de la religion catholique et fait des études de médecine à l'Université de Pise, qui ne correspondent pas du tout à ses goûts. A 19 ans, il découvre l'architecture, la perspective, la mécanique ; facultés qui jouent toujours sur des bases mathématiques. Il suit en parallèle des cours de philosophie et de cosmologie. Grâce à cette acquisition simultanée de mathématiques théoriques et pratiques se forge en lui un esprit théorique: Galilée manifeste son goût pour une esthétique classique, simple et harmonieuse.

Galilée voit la religion comme une conception du monde. Dieu est pour lui le Grand Architecte, l'Horloger, auteur de la fantastique structure mathématique de l'univers. Il admire et respecte l'Église pour sa capacité d'instaurer une vérité universelle. C'est pour cela qu'il dépensera de l'énergie à essayer de convertir les autorités ecclésiastiques à l'héliocentrisme : c'est par l'Église seule que cette vérité peut devenir universelle. Cependant, la théorie promue par l'Église à l'époque est celle d'Aristote : le cosmos est un gigantesque ensemble fermé, composé de huit sphères concentriques transparentes qui tournent autour d'un point central fixe : la Terre. Sur chaque sphère est accrochée une planète ; sur la quatrième, le Soleil ; sur une huitième, à l'extérieur, les étoiles. La plus petite sphère est celle où est accrochée la Lune ; elle délimite le monde sublunaire, monde du changement, de l'altération, des choses corruptibles ; au-delà, c'est le ciel éthéré, immuable, qui n'affecte aucun changement.

Galilée enseigna à Florence, et obtint une chaire de mathématique à Pise en 1589. Il montra qu'Aristote se trompait en supposant que la vitesse de chute d'un corps était proportionnelle à son poids. En 1592, Galilée devint professeur de mathématique à l'université de Padoue, où il resta 18 ans. Il construisit un appareil de mesure, le sextant, travailla à une explication du phénomène des marées basée sur les théories coperniciennes et écrivit un traité de mécanique montrant que les machines ne créaient pas d'énergie, mais la transformaient.

En 1602, Galilée reprit ses recherches sur le plan incliné et le mouvement du pendule. Vers 1604 il formula la loi fondamentale de la chute des corps qu'il vérifia par des mesures très précises.

Lorsqu'une supernova apparut en 1604, Galilée se disputa avec les philosophes qui soutenaient les thèses d'Aristote sur l'immuabilité du ciel. Reprenant ses études sur le mouvement, Galilée montra que les projectiles suivaient des trajectoires paraboliques.

En 1609, instruit de l'invention par un hollandais d'un instrument optique qui permettrait d'augmenter la taille apparente et la luminosité des objets du ciel, il commença à construire ses propres appareils totalement différents de ceux des Pays Bas, appelés lunettes astronomiques.

A la fin de 1609, Galilée possédait une lunette qui grossissait 20 fois, ce qui lui permettait d'étudier les cratères lunaires et de distinguer les étoiles de la voie

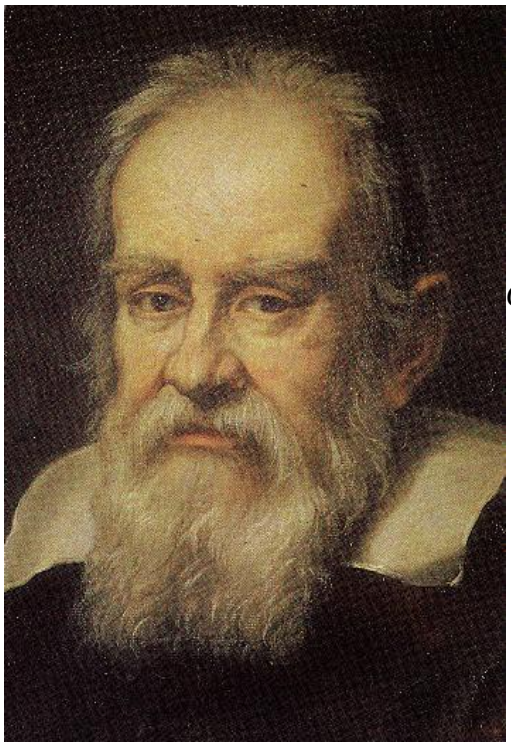
lactée. Il découvrit quatre satellites de Jupiter. Il publia ses découvertes dans *Le messager des étoiles* en 1610; cela suscita de grandes controverses car les autres scientifiques ne disposaient pas d'appareils grossissants et ne pouvaient confirmer ses observations. Le cosmos d'Aristote est sérieusement remis en cause.

Le grand duc de Toscane le nomma mathématicien de la cour de Florence, ce qui lui permit de consacrer tout son temps à la recherche. Galilée continua à faire de remarquables découvertes scientifiques en observant les phases de Venus qui, avec les satellites de Jupiter, le convainquirent que Copernic avait raison. La lunette est bel et bien l'outil providentiel qui va permettre à Galilée de confirmer l'héliocentrisme. L'Église s'opposa vigoureusement aux vues de Galilée, mais celui-ci plaida pour la liberté de la recherche dans sa *Lettre à la grande duchesse Christine* en 1615. En dépit de ses arguments, le Saint Office de Rome publia un édit contre Copernic en 1616.

En 1623, le pape Urbain VIII autorisa Galilée à écrire un livre comparant les systèmes de Ptolémée et de Copernic. Cependant, il est mis en garde de tous les côtés : « ne vous mêlez pas des l'interprétation des Écritures. » Mais son désir de prouver à l'Église qu'il a raison l'emmène trop loin : les *Dialogues* de 1632 conduisirent Galilée à être jugé à Rome par l'Inquisition sur le fait qu'en 1616 il lui avait été interdit de défendre ou d'enseigner les théories de Copernic. Le jugement de l'Inquisition ne fut annulé qu'en 1992.

En juin 1633, Galilée fut condamné à la prison à vie pour « grave suspicion d'hérésie ». Ses *Dialogues* furent censurés et on interdit aux éditeurs de publier les travaux passés ou futurs de Galilée. Hors d'Italie les *Dialogues* furent traduits en latin et influencèrent les savants dans toute l'Europe.

La condamnation de Galilée fut commuée en mise en résidence, d'abord sous la garde de l'archevêque de Sienne et ensuite dans sa propre maison d'Arcetri près de Florence. Là, Galilée acheva ses recherches sur le mouvement et la résistance des matériaux. Il publia à Leiden *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux nouvelles sciences* en 1638. Ce travail marqua le début de l'étude de la dynamique. Galilée mourut à Arcetri, près de Florence, 8 janvier 1642; son esprit fut actif jusqu'au dernier moment.



Galileo Galilei par Giusto Sustermans en 1636.

II. LA LUNETTE ASTRONOMIQUE

1- Historique

L'origine de l'invention de la lunette astronomique est controversée, elle viendrait d'Italie (vers 1590) ou du nord de l'Europe (Pays-Bas, vers 1608). Giambattista della Porta, physicien et opticien italien, la mentionna dans son ouvrage *La Magie naturelle* (1589). Par la suite, plusieurs scientifiques cherchèrent à en obtenir le brevet : Hans Lippershey, qui fut le premier à faire une démonstration concrète d'une lunette d'approche de grossissement trois, à la fin du mois de septembre 1608, Sacharias Jansen qui en aurait vendu à la foire d'automne de Francfort en septembre 1608, et Jacques Metius. Ce dernier est soutenu par Descartes, qui parle de cette invention au début de sa *Dioptrique* :

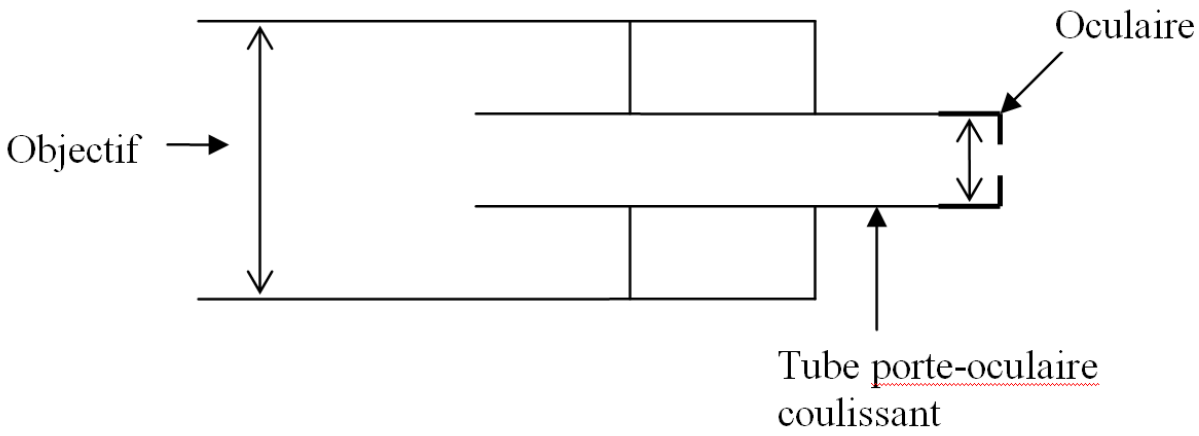
« Mais, à la honte de nos sciences, cette invention, si utile et si admirable, n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune. Il y a environ trente ans, qu'un nommé Jacques Metius, de la ville d'Alkmaar en Hollande, homme qui n'avait jamais étudié, bien qu'il eût un père et un frère qui ont fait profession des mathématiques, mais qui prenait particulièrement plaisir à faire des miroirs et verres brûlants, en composant même l'hiver avec de la glace, ainsi que l'expérience a montré qu'on en peut faire, ayant à cette occasion plusieurs verres de diverses formes, s'avisa par bonheur de regarder au travers de deux, dont l'un était un peu plus épais au milieu qu'aux extrémités, et l'autre au contraire beaucoup plus épais aux extrémités qu'au milieu, et il les appliqua si heureusement aux deux bouts d'un tuyau, que la première des lunettes dont nous parlons, en fut composée. »

Dès que la lunette d'approche fut connue et commença à se répandre, Thomas Harriot, Christoph Scheiner, et bien d'autres la tournèrent vers le ciel au début de 1609 pour observer les objets célestes. Mais c'est Galilée qui, à partir d'août 1609 établit véritablement la lunette d'approche comme instrument d'observation astronomique. Un ami, Jacques Badovere, lui ayant confirmé la rumeur qui courait sur l'existence d'un tel objet et le lui ayant décrit, il ne tarda pas à en construire une lui-même. Au fil de ses observations, il perfectionna son principe obtenant un grossissement de 20, puis de 30 (alors qu'il n'était que de 6, environ, au départ). Il construisit également une lunette dite « galiléenne » permettant d'avoir une image droite (donc non renversée) à l'infini en utilisant une lentille divergente comme oculaire (mais, on y perdait beaucoup en termes de luminosité). Cette lunette était très utile pour les marins et en temps de guerre. En effet, pour observer les étoiles avoir une image droite ou renversée n'importe que très peu.

Première représentation d'une lunette : Paysage sur le château de Mariemont de Jan Bruegel l'Ancien (1608-1612)

2- Fonctionnement

Principe général



Une lunette astronomique est un instrument d'optique destiné à observer les astres ou les objets éloignés.
Elle est formée de deux systèmes convergents :

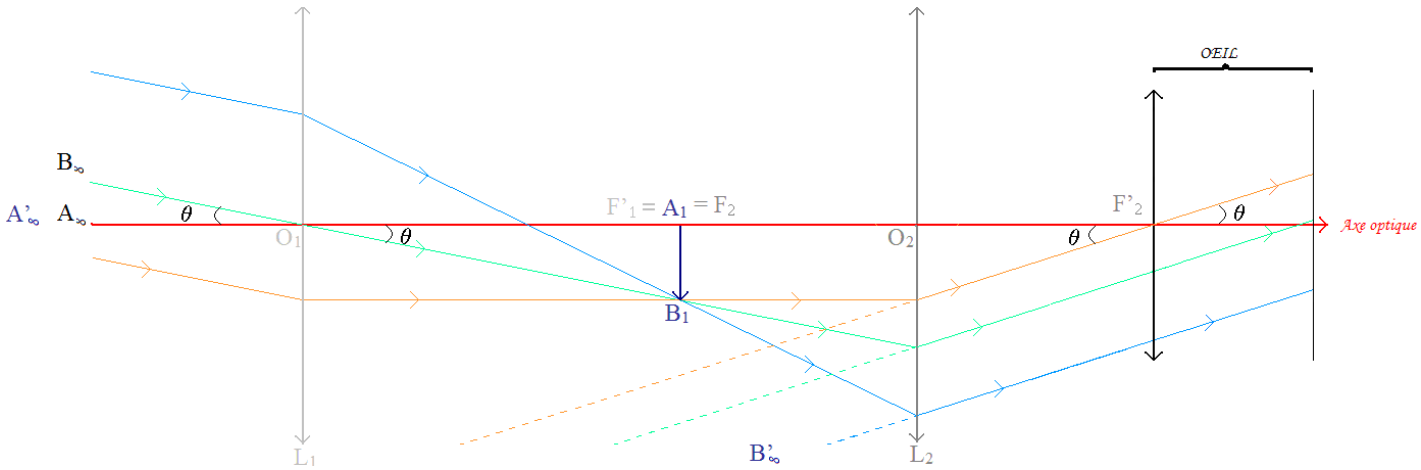
-Un objectif de très grande distance focale (f' > 1m) et de grand diamètre.

-Un oculaire qui joue le rôle de loupe, dont la distance focale est de l'ordre du cm.

Ces deux systèmes convergents sont assimilables à des lentilles minces de même axe principal.
Les objets observés sont, dans tous les cas, considérés comme étant situés à l'infini.

Notre lunette

Objectif L1 : + 1 dioptrie donc f' = 1 / C = 1 m
Oculaire L2 : +30 dioptries donc f' = 1 / C = 3,33 cm



L'astre AB est situé à l'infini car il est très éloigné de la lentille, donc l'image

objective A_1B_1 de l' astre se forme dans le plan focal image de l'objectif.
L'image A_1B_1 joue le rôle d'objet pour l'oculaire. Pour que l'œil n'accommode pas, il faut qu'il observe une image située à l'infini. Si A_2B_2 est située à l'infini alors A_1B_1 est dans le plan focal objet de L2, or A_1B_1 est aussi située dans le plan focal image de l'objectif : donc $F'_1 = F_2$.
Si l'œil n'accommode pas, il doit être placé dans son plan focal image de l'oculaire.
On a ainsi : $O_1 F'_1 = 1$ m $F'_1 O_2 = F'_2 O_2 = 3{,}33$ cm $O_2 O_3 = O_2 F'_2 = 3{,}33$ cm

Distance entre les deux lentilles : $O_1 F'_1 + F'_1 O_2 =$ 1 m + 3,33 cm = 1,0333 cm

3- Matériel et construction

	Lunette	Support
Matériel	- tube à dessin diamètre 7 cm - lentille : +30 ; +1 - carton et morceaux de bois pour caler	- trépied - carton 1 et 2 mm - plaque de métal - carton arrondi - écrou
Construction	Il s'agit de caler les deux lentilles à chaque extrémité du tube à dessin (à précisément 1,0333 m de distance). Nous le faisons grâce à deux morceaux de carton qui ont un trou un peu plus petit que la taille de la lentille. Ces morceaux de carton tiennent eux-mêmes grâce à trois morceaux de bois.	Nous avons superposé trois morceaux de mêmes dimensions de carton 1 mm, de métal, et carton 2mm, tous perforés d'un trou au centre. Nous les avons déposé sur la vis du trépied. Puis, nous avons fixé à l'aide de l'écrou un morceau de carton arrondi qui tiendra la lunette.

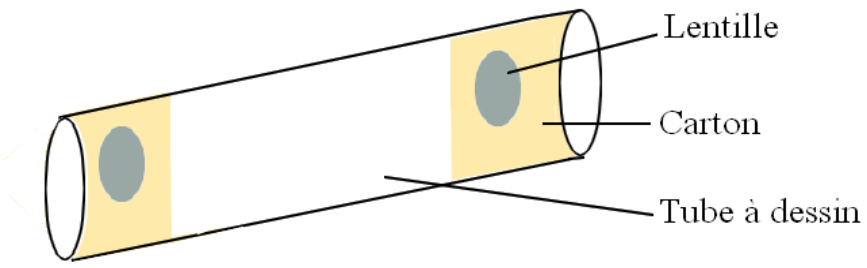


Schéma simplifié de la lunette

III. DECOUVERTES DE GALILEE

1 – Jupiter et ses satellites

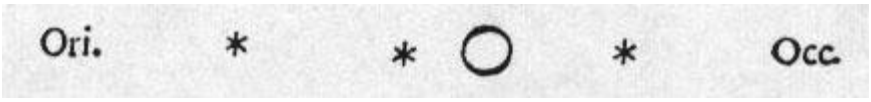
Jupiter et ses quatre satellites : Io, Europe , Ganymède et Callisto

Au cours d'observations du mois de janvier 1610, Galilée fait une découverte capitale : il remarque les quatre satellites de Jupiter. Les quatre corps célestes, qui sont les premiers ayant été découverts au moyen d'un instrument optique autre que l'œil nu, sont d'abord nommés par Galilée « Cosmica Sidera », en l'honneur de Cosimo II de Medicis, grand-duc de Toscane à partir de 1609, et dont Galilée cherchait le patronage. Galilée les appellera ensuite les « Medicea Sidera » (« étoiles Médicées »), en l'honneur des quatre frères de la maison Médicis (Cosimo, Francesco, Carlo et Lorenzo). Ce seront les noms proposés par Simon Marius qui s'imposeront : Io, Europe, Ganymède et Callisto, publiés dans le *Mundus Jovialis* en 1614. Cependant, Galilée refuse d'utiliser les noms proposés par Marius et invente par conséquent le système de numérotation qui est encore utilisé de nos jours, en parallèle avec les noms propres. La numérotation commence par la lune la plus proche de Jupiter : I pour Io, II pour Europe, III pour Ganymède et IV pour Callisto.

La découverte fut annoncée dans le *Sidereus Nuncius (« Le messager céleste »)*, publié à Venise en mars 1610, moins de deux mois après les premières observations. Il révèle ainsi au monde une preuve nouvelle extraordinaire en faveur du système de Copernic. En effet, cette découverte de Galilée allait bouleverser notre connaissance du système solaire : on avait un exemple de mouvement qui ne se faisait pas autour de la Terre. Et la Terre n'était plus une exception puisque Jupiter aussi avait des lunes qui le suivaient dans son mouvement autour du Soleil.

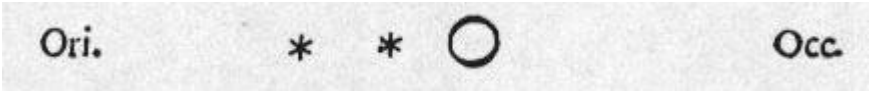
A. La découverte

Le 7 janvier 1610, vers une heure du matin, alors que Galilée explore le ciel avec sa lunette, il aperçoit « trois petites étoiles » à côté de Jupiter. Elles étaient alors alignées : il y en avait deux à l'est et une à l'ouest (voir schéma ci-dessous). Croyant, qu'il s'agissait d'étoiles fixes, Galilée ne fis donc pas attention à leur distance à Jupiter.



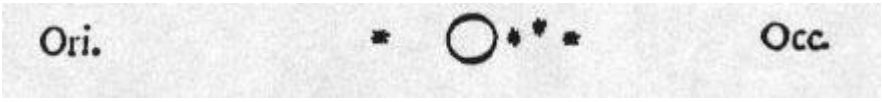
Le 8 janvier, Galilée refait la même observation et c'est alors qu'il découvre une configuration complètement différente : les trois étoiles étaient maintenant toutes du côté ouest de Jupiter, et elles étaient plus proches les unes des autres que la veille, à distances égales l'une de l'autre, comme sur le schéma suivant :

Le 10 janvier il recommence alors de nouvelles observations, étant incapable d'expliquer un tel phénomène. Cette nuit-là, il n'y avait que deux étoiles, et toutes deux à l'est de Jupiter et alignées avec la planète (voir schéma ci-dessous). Galilée suppose alors que la troisième était cachée par la planète. Il comprend alors que ces changements de positions relatives n'étaient pas dus à Jupiter mais aux étoiles elles-mêmes. Pour cette raison, Galilée décide de continuer les observations.



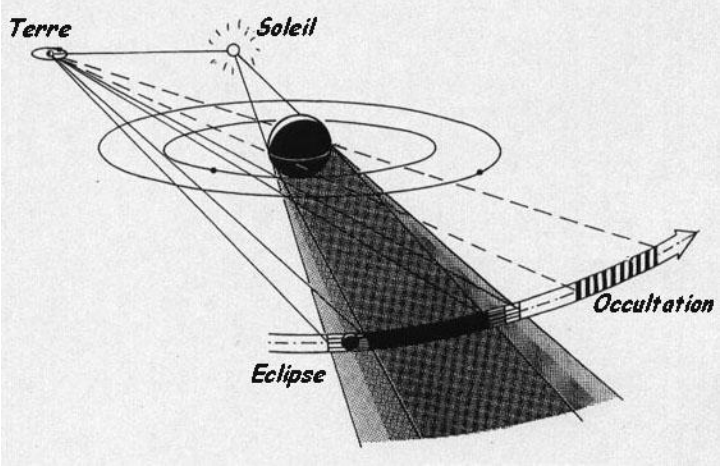
Le 11 janvier, il remarque seulement deux étoiles à l'est de Jupiter, celle du centre étant trois fois plus loin de Jupiter que de l'autre étoile (voir schéma ci-dessous). De plus, celle la plus à l'est était deux fois plus brillante que celle du centre alors que la nuit précédente elles étaient apparues à Galilée de même magnitude. Il admet ainsi qu'il y a dans le ciel des étoiles qui tournent autour de Jupiter.

Ce n'est que le 13 janvier que Galilée put observer les quatre satellites simultanément, disposés de la manière suivante :



B. Les éclipses

Les satellites galiléens présentent des phénomènes particuliers dus aux positions que prennent le Soleil, Jupiter et la Terre. Nous nous pencherons sur les éclipses, c'est-à-dire lorsqu'un satellite passe dans l'ombre de Jupiter.



Les éclipses ont lieu quand les satellites passent dans l'ombre de Jupiter
(Les occultations ont lieu quand les satellites passent derrière Jupiter pour un observateur terrestre)

C'est le 12 janvier 1610, alors qu'il observait les satellites de Jupiter, que Galilée fut le premier à assiste à une éclipse par Jupiter, mais il n'en comprend la signification qu'en 1612. Il fallut attendre 1643 pour une observation de l'ombre d'un des satellites sur Jupiter (par Fontana). Les observations d'éclipses de satellites par Jupiter se sont fortement développées par la suite car on comprit tout l'intérêt des éclipses par Jupiter : l'observation ne nécessitait que de noter l'heure du phénomène et cela donnait une position précise du satellite puisqu'il entrait ou sortait de l'ombre de Jupiter. Une fois les prédictions d'éclipses réalisées, l'observation d'une éclipse permettait d'obtenir une heure commune à tous les observateurs terrestres et donc de déterminer la longitude du lieu d'où l'on observait. De plus, elles étaient la seule manière d'améliorer les tables du mouvement des satellites. Les premières tables furent faites par Galilée en 1612.

C. Tables des satellites de Jupiter.

Galilée voit très vite dans la découverte des quatre satellites de Jupiter un moyen de mesurer la longitude terrestre à condition de pouvoir disposer des tables précises. Pour cela, il fallait mesurer régulièrement la position des quatre satellites d'une façon moins approximative que celle présentée dans son ouvrage.

Le dispositif est ingénieux : il fixe un cylindre de carton qui coulisse le long du tube. Sur ce cylindre il adapte une règle (ou une grille) graduée. Il observe alors Jupiter avec un œil sur la lunette et l'autre fixant la grille. En faisant coulisser le tube il positionne le diamètre de Jupiter entre deux graduations. Des graduations intermédiaires lui permirent de donner plus de précision à ses mesures. Ce diamètre servira d'unité pour mesurer ensuite la distance des satellites.

Dans un premier temps les observations de Galilée furent purement descriptives. Les observations contenues dans le *Sidereus Nuncius* vont du 7 janvier 1610 au 21 au 1611. Il dut interrompre ensuite ses observations, en raison d'un voyage à Florence, et à cause de la proximité de Jupiter au Soleil. Il les reprend le 25

juillet 1610, date à partir de laquelle apparaît, dans les carnets, la mention de la distance des satellites en rayons de Jupiter pris comme unité. A ce moment les distances sont en valeurs entières du rayon de Jupiter.
Dans un premier temps il calcula la distance des satellites à Jupiter au moment de leur plus grande élongation. Il aboutit à des premières valeurs qu'il corrigea en quatre fois, pour arriver en 1627 aux valeurs suivantes :

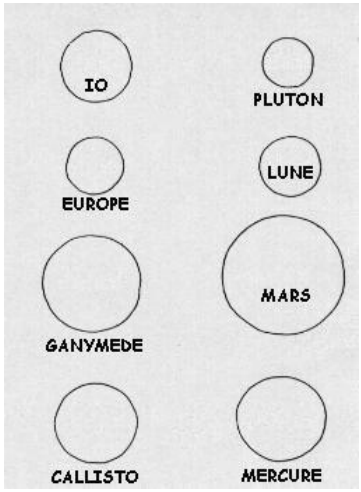
Satellite 1	5 rayons 11/16
Satellite 2	8 rayons 5/8
Satellite 3	14 rayons
Satellite 4	25 rayons

Il dressa alors, de 1611 à 1619, les éphémérides des positions des satellites. Pour cela il nota le jour d'observation et l'heure (à partir du coucher de soleil). Il choisit l'origine à un moment où les quatre satellites étaient confondus avec Jupiter. En outre, il réalisait maintenant plusieurs observations par nuit.

D. Les satellites de Jupiter aujourd'hui

Jupiter possède 63 satellites naturels connus. Ainsi, la plus grande planète du système solaire est aussi celle qui s'entoure du plus grand nombre de satellites. Io, Europe, Ganymède et Callisto, encore appelés les lunes galiléennes en honneur de leur premier observateur, sont les premiers satellites de Jupiter découverts. (Cependant, il est possible cependant qu'une observation antérieure ait été réalisée en 362 av. J.-C. par l'astronome chinois Gan De). Au cours des quatre siècles suivants, huit autres satellites furent. Pendant les années 1970, deux autres satellites furent observés. Enfin, des années 2000 à nos jours, le reste des satellites de Jupiter ont été découverts.

Les satellites galiléens se distinguent nettement des autres satellites de Jupiter qui ne sont que des petits corps rocheux semblables à des astéroïdes communs : ce sont des corps remarquables à bien des égards. En effet, les quatre satellites sont les plus anciens corps connus non visibles directement à l'œil nu et forment en tournant autour de Jupiter, un système solaire en miniature. De plus, ces quatre lunes galiléennes sont les plus grands satellites du système jovien et ont des tailles comparables à Mercure. En effet, la 5e plus grande lune du système, Amalthée, ne fait que 250 km dans sa plus grande dimension, alors que Europe, la plus petite des lunes galiléennes, mesure environ 3 100 km de diamètre.



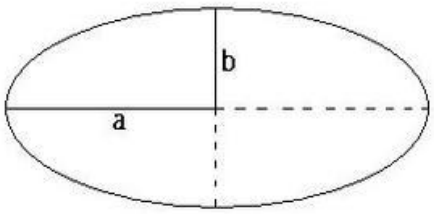
La figure ci-dessus montre les tailles comparées des satellites de Jupiter avec la lune, Mercure, Mars et Pluton. On voit qu'il s'agit bien de véritables petites planètes. Le plus gros astéroïde n'a un diamètre qui n'atteint qu'un quart du plus petit satellite galiléen.

Elaborons à présent, une étude plus approfondie des quatre lunes galiléennes.

Calcul de l'excentricité e :

On sait que :

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$



a : demi-grand axe
b : demi-petit axe

-Io

AN: a = 421 800 km b = 421 796 km

donc : e = 0,004

-Europe

AN: a = 671 100 km b = 671 073 km

donc: e = 0,009

-Ganymède

AN : a = 1 070 400 km b = 1 070 398 km
donc : e = 0,002

-Callisto

AN: a = 1 882 700 km b = 1 882 654 km
donc : e = 0,007

Calcul de l'altitude z :

On sait que :

$$z = \sqrt[3]{\left(\frac{T \times R \times \sqrt{g}}{2\pi}\right)^2} - R$$

Avec :
R le rayon de Jupiter, R = 71 492 km = 71 492.10^3 m
g, la pesanteur de Jupiter, g = 2,36 m/s^2
T, la période de révolution du satellite autour de Jupiter

-Io

AN: T = 1 jours 18 h 14 min 24 s = 152 064 s
Donc : z = 81 139 778 m = 81 139,8 km

-Europe

AN: T = 3 j 13 h 14 min = 306 840 s
Donc : z = 133 832 756 m = 133 832,8 km

-Ganymède

AN: T = 7,15 j = 617 760 s
Donc : z = 2 176 365 311 m = 2 176 365,3 km

-Callisto

AN: T = 16 jours 16 h 48 min = 1 442 880 s
Donc : z = 3 885 595 855 m = 3 885 595,9 km

Calcul de la vitesse v :

On sait que :

$$v = R\sqrt{\frac{g}{(R+z)}}$$

Avec :
R le rayon de Jupiter, R = 71 492 km = 71 492.10^3 m
g, la pesanteur de Jupiter, g = 2,36 m/s^2
z, l'altitude du satellite à Jupiter

-Io

AN: z = 81 139 778 m
Donc : v = 8 889,8 m/s

-Europe
AN: z = 133 832 756 m
Donc : v = 7 664,7 m/s

-Ganymède
AN: z = 2 176 365 311 m
Donc : v = 2 316,5 m/s

-Callisto
AN: z = 3 885 595 855 m
Donc : v = 1 745,9 m/s

Jupiter et ses satellites galiléens
Jupiter, Io (haut gauche), Europe (centre), Ganymède (bas milieu) et Callisto (coin bas droit)

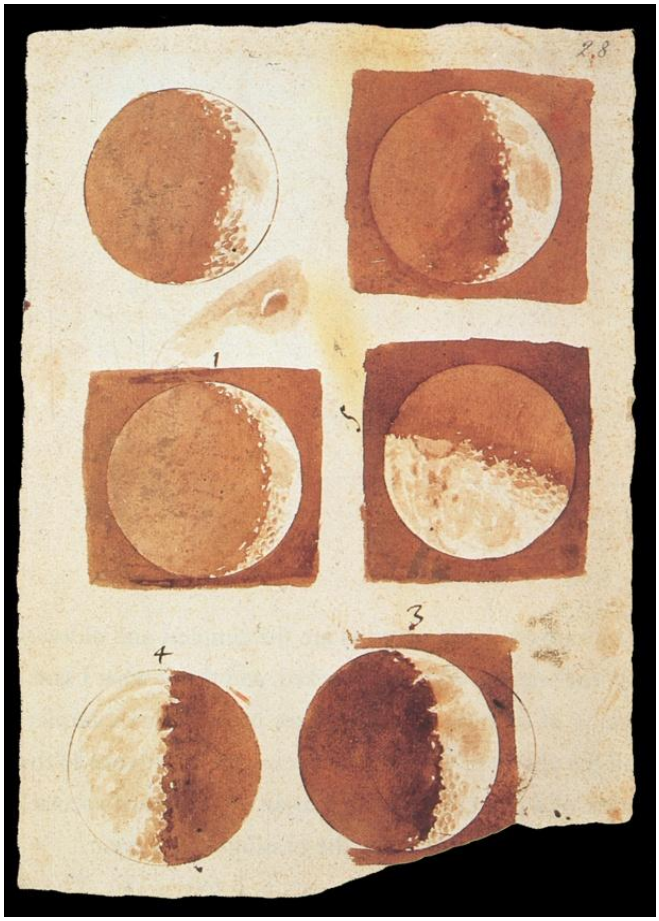
Ainsi, la découverte des quatre satellites galiléens a bouleversé notre connaissance du système solaire : on avait un exemple de mouvement qui ne se faisait pas autour de la Terre. Et la Terre n'était plus une exception puisque Jupiter aussi avait des lunes qui le suivaient dans son mouvement autour du Soleil. De plus, l'étude des phénomènes de ces satellites, telles les éclipses, ont permis par la suite l'amélioration de nombreuses études comme le développement des tables du mouvement des satellites ou encore le calcul de la longitude.

Aujourd'hui, on compte 63 satellites dans le système jovien. Cependant, les satellites galiléens de Jupiter restent ceux les plus remarquables à bien des égards. Ce sont les plus anciens corps connus non visibles directement à l'œil nu, ils ont des tailles comparables à Mercure et forment, en tournant autour de Jupiter, un système solaire en miniature. Leurs mouvements rapides sont facilement observables et génèrent des phénomènes d'éclipses spectaculaires. De plus, les sondes spatiales nous ont récemment montré des corps d'une grande diversité géologique (volcans actifs, banquises, présence d'eau, ...). Tout cela en fait des objets très étudiés par les astronomes et une des principales cibles de la conquête spatiale.

1 – La lune

A. Historique

Galilée présente sa lunette aux doges de Venise le 25 août 1609. Au mois d'octobre, Galilée observe la Lune. Mais les conditions sont médiocres et Galilée entreprend d'améliorer son instrument. Le 30 novembre 1609, il dispose d'une nouvelle version capable de grossir vingt fois et contemple alors la Lune de nouveau. Il s'agit alors d'une révolution dans l'histoire des sciences, une nouvelle Lune moderne, débarrassée de ses mythes apparaît : Galilée observe des formes irrégulières sur le croissant considéré à cette époque comme astre parfait tel que le Soleil. C'est alors qu'il publie son œuvre Sidereus Nuncius (Le messager des étoiles) associé à de nombreuses aquarelles.



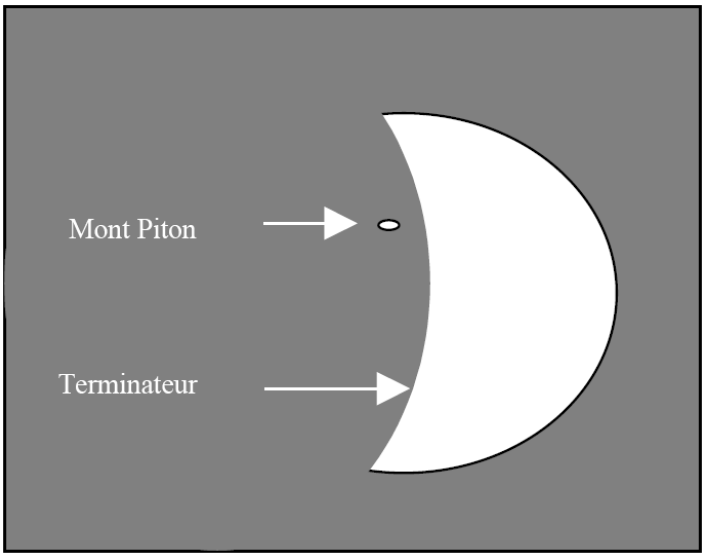
Dessins des phases la Lune par Galilée au cours de ses observations

Il décide donc d'étudier les grandes taches sombres de la lune ainsi que son relief accidenté. Malgré la médiocrité de sa lunette, il suppose l'existence de montagnes et de vallées ainsi que l'irrégularité des taches sombres. Il compare alors la Lune à la Terre : tous deux corps aux reliefs importants et aux taches sombres. Il associe hypothétiquement les taches de la Lune aux océans de la Terre, et le reste, roches blanchâtres, aux continents de la Terre. Il remarque également à coté de ces « mers », d'autres taches plus petites, les cratères. C'est notamment grâce aux jeux d'ombres et

de lumière produits par ces structures à mesure de l'avancée du mois lunaire que Galilée démontra que la surface de la Lune n'était pas régulière et que ce corps n'avait pas non plus une sphéricité parfaite.

B. Comment Galilée calcula-t-il la hauteur des montagnes sur la Lune ?

On se propose de calculer le sommet d'une montagne sur la Lune à partir d'observations faites par Galilée. En effet, ce-dernier observa des jeux d'ombres et de lumière, les ombres correspondant aux creux et les points lumineux aux plaines et montagnes. Il observa notamment des points lumineux qui correspondent aux sommets de montagnes situées dans les zones d'ombres.



Le terminateur est la frontière entre la partie de la Lune encore dans l'ombre de la nuit et la partie éclairée par le soleil.
En raison de leur hauteur, les sommets des montagnes, éclairés par les rayons du soleil rasant, apparaissent bien avant leur passage dans la zone de jour.
C'est ce qui se produit sur ce dessin pour le mont Piton.

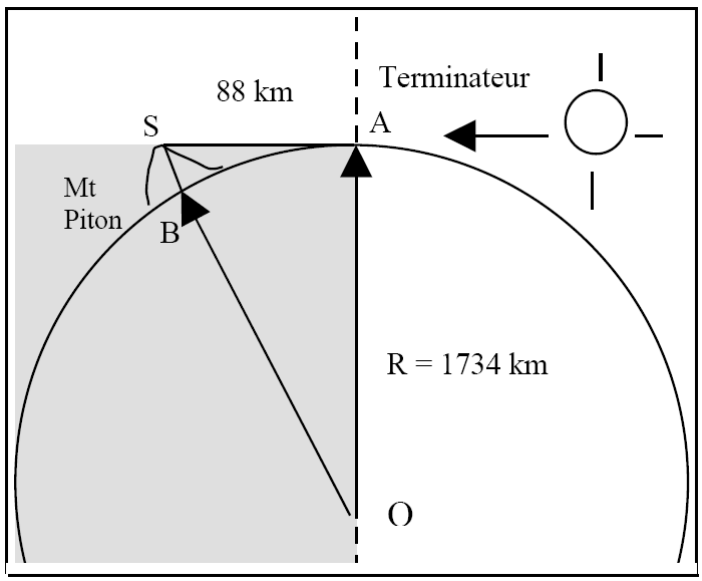
L'application du théorème de Pythagore au schéma précédent donne:

$$R^2 + d^2 = (R + h)^2$$

soit $$h = \sqrt{R^2 + d^2} - R$$

Avec un rayon R = 1734 km et une distance AS = d = 88 km, on obtient la hauteur du mont Piton :

h = 2232 km



C. Bilan

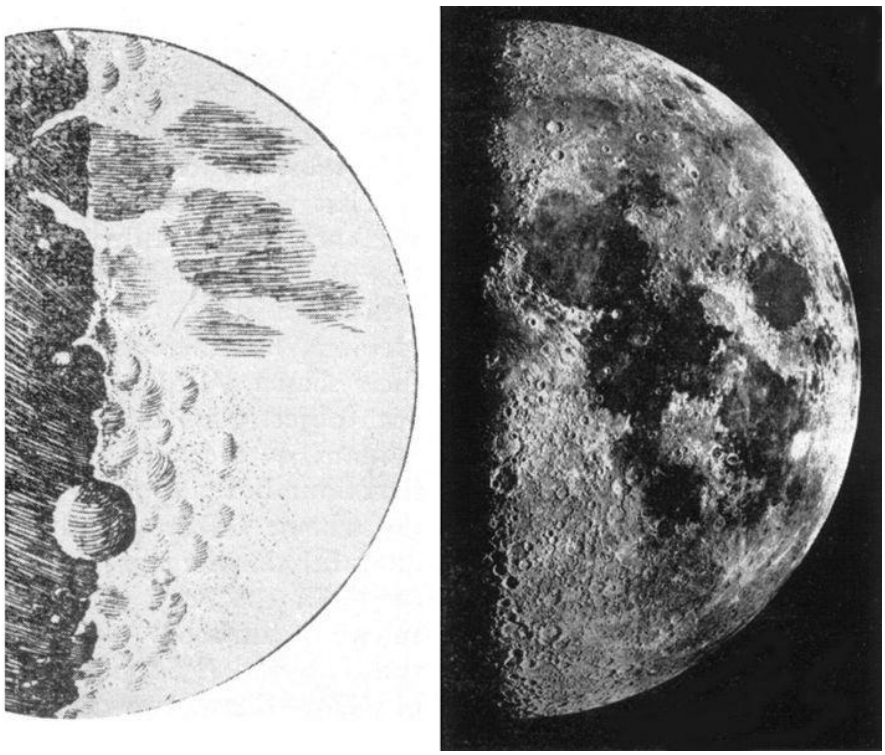
Ainsi, Galilée, en observant les phases de la lune, il découvre, quelques mois après Thomas Harriot, que cet astre n'est pas parfait comme le voulait la théorie aristotélicienne.

La physique aristotélicienne, qui faisait autorité à l'époque, distinguait deux mondes :

* le monde « sublunaire » : comprenant la Terre et tout ce qui se trouve entre la Terre et la Lune ; dans ce monde tout est imparfait et changeant ;

* le monde « supralunaire » : qui part de la Lune et s'étend au-delà. Dans cette zone, il n'existait plus que des formes géométriques parfaites (des sphères) et des mouvements réguliers immuables (circulaires).

Galilée quant à lui, observa une zone transitoire entre l'ombre et la lumière, le terminateur, qui n'était en rien régulière, ce qui par conséquent invalidait la théorie aristotélicienne. Galilée en déduit l'existence de montagnes sur la Lune et estime même leur hauteur à 7 000 mètres, davantage que la plus haute montagne connue à l'époque. Il faut dire que les moyens techniques de l'époque ne permettaient pas de connaître l'altitude des montagnes terrestres sans fantaisie. Quand Galilée publie son Sidereus Nuncius (Messager Céleste), il pense que les montagnes lunaires sont plus élevées que celles de la Terre, bien qu'en réalité elles soient équivalentes.



Dessins des montagnes de la Lune, par Galilée, en bilan de ses observations

3 – Les phases de Vénus

"Haec Immatura a me jam frustra leguntur,o.y."
"En vain, ces choses sont accueillies aujourd'hui prématurément par moi"

C'est avec cet anagramme signifiant "Cynthiae figures ormulatur later amorum" ou "La mère des amours imite les phases de Diane" que Galilée annonce à Kepler sa découverte quant aux phases de Venus au printemps 1910.

A. Les observations de l'étoile du berger

Le ciel florentin d'Arcetri au soir des premières observations de Venus par Galilée. (selon le logiciel Starri Night)

Après avoir observé les satellites de Jupiter en Janvier 1610, Galilée entreprend l'observation d'une autre planète, celle que l'on dit être la « sœur jumelle » de notre planète Terre, Venus.

« Pour entendre l'astronomie et se rendre maître de cette science, il faut étudier autre chose qu'Aristote, dont les écrits ne laissent pas voir qu'il ait eu, en pareille matière plus de connaissance que n'importe quel homme du commun »

écrit Galilée dans une lettre à Fortunio Liceti, spécialiste italien d'Aristote au VXIIe siècle, et suivant ce précepte il commence ses observations.

La première nuit, Venus se trouvait à une magnitude -4 (*la magnitude apparente, en* astronomie, *mesure la luminosité — depuis la* Terre — *d'une* étoile, *d'une* planète *ou d'un autre*

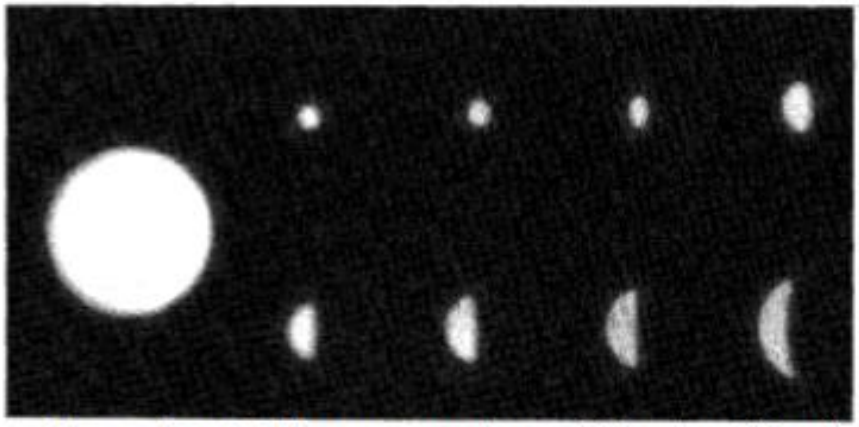
objet céleste. *Cette grandeur a la particularité d'avoir une échelle* logarithmique *quadruple*), couchée sur l'horizon et brillait très fortement parmi les étoile. On estime qu'elle était illuminée à 81 % ce soir-là et que son diamètre était de 13''. Galilée fut particulièrement intéressé par la forme de cette planète et se mit à l'observer régulièrement à partir de novembre 1610, ainsi, il nota que la forme arrondie de celle-ci se transformait.

En Décembre 1610, il observe une « demi-lune » de Venus à une magnitude -4,4 et à 15° au-dessus de l'horizon . Son diamètre à ce moment-là est de 25'', donc en un mois, il a pu remarquer une augmentation de la taille de Venus. Plus tard au mois de décembre, il observe que la demi-lune s'échancre et que la vitesse de changement s'accélère. Mais, c'est en Février qu'il observe un changement important : Vénus forme un croissant de 57'' de diamètre et est illuminée à 5% seulement. De plus, elle n'est plus qu'à 8° au-dessus de l'horizon, et sa magnitude ne change pas beaucoup, environ -4,3. Pourtant, pour la première fois, il peut distinguer les côtés jaunes-orangés de Venus.
Ainsi, en à peine 5 mois d'observations, le diamètre de Vénus a été quintuplé passant donc de 13'' à 57'' (18% de fois plus que le diamètre de Jupiter) et la planète a changé de position allant de 15° à 8° au dessus de l'horizon.
Galilée observe, en comptant les jours que Venus a une période de révolution égale à environ 224 jours.

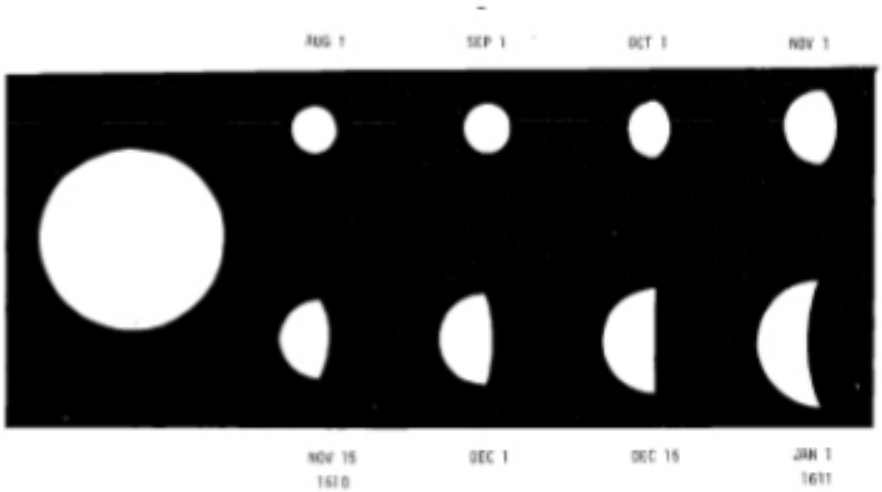
Pour mieux se rendre compte des découvertes de Galilée, on a pu reconstituer les images que Galilée a probablement observées.

Vénus en décembre 1611

Vénus en janvier 1611



Observation de Vénus avec une lunette légèrement défocalisée (Gingerich) : la phase gibbeuse est difficile à affirmer.



Vénus au moment où Galilée a réalisé ses observations (Gingerich)

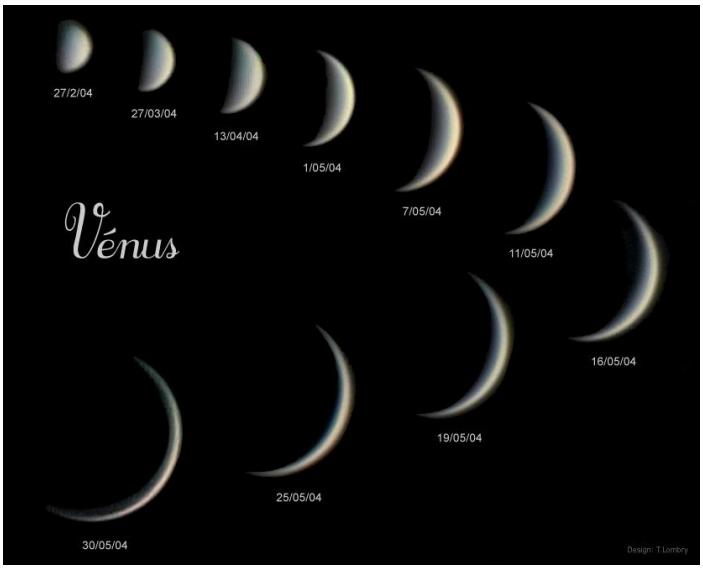
D'après les écrits de Galilée, il n'a pas aperçu ou remarqué la phase gibbeuse de Venus, ce qui s'explique très bien par la comparaison d'images défocalisées comme celles de Galilée à des images plus précises. En effet, on remarque que sur les images que Galilée aurait a priori observées, les trois premières phases de Venus ne mettent en évidence qu'un grossissement de la planète.

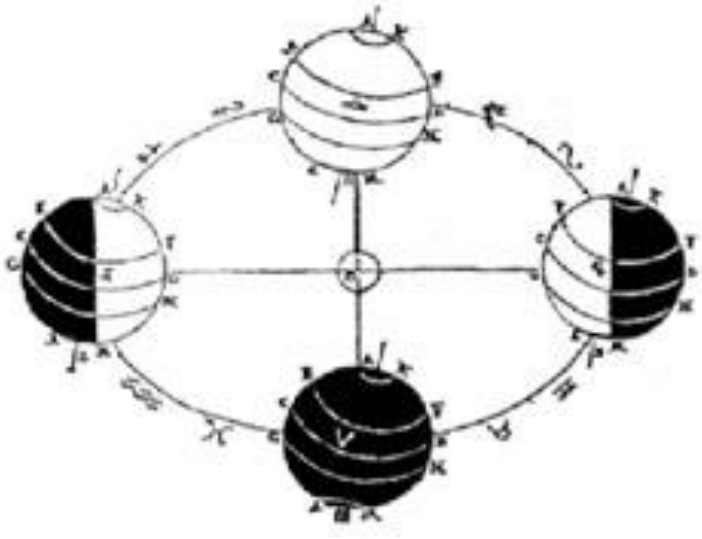
Que peut donc tirer Galilée de ces observations ? Une théorie qui bouleversera le monde…

B. Une remise en cause du système de Ptolémée

Après 5 mois d'observations, Galilée a pu observer le phénomène suivant (celui-ci s'étant répété entre février et mai 2002) :

Reconstitution image par image du phénomène à gauche et dessin de Galilée résumant ses observations à droite.

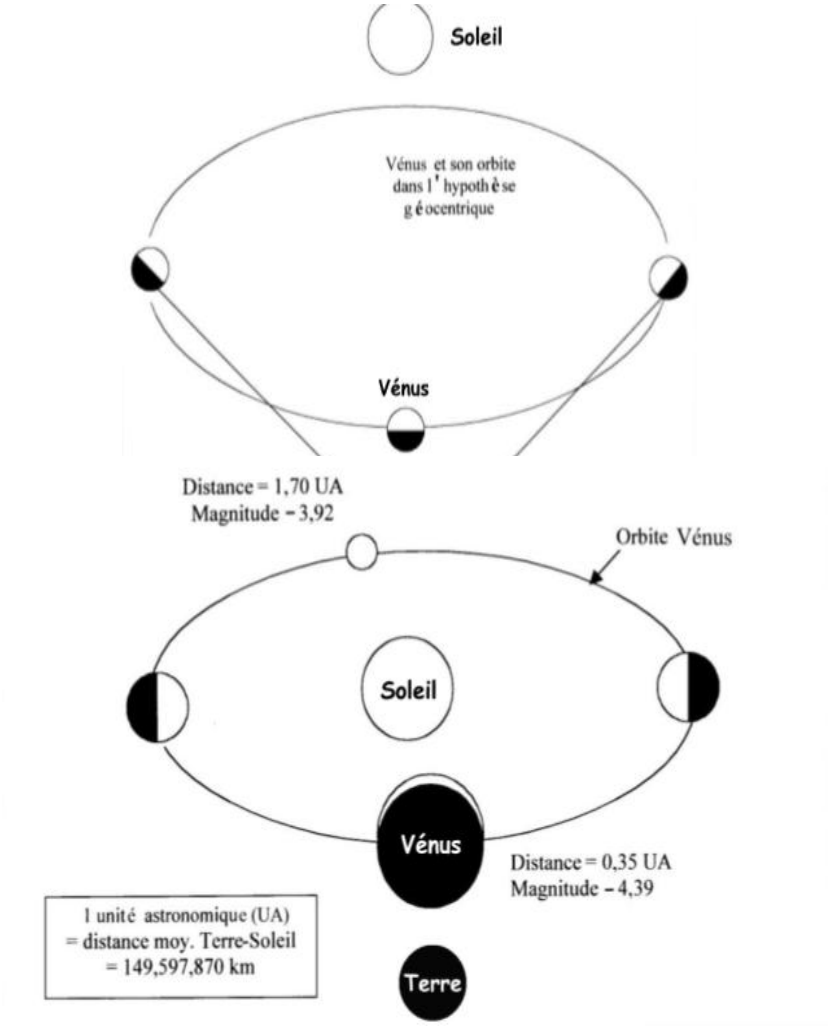




L'observation des phases de Venus met en évidence le fait que Vénus est en rotation autour d'une autre planète, car elle présente des phases et une trajectoire elliptique autour d'un axe. Galilée peut donc rapprocher le mouvement de Venus à celui de la Lune, ce qui le met sur la piste d'une rotation autour du Soleil. Selon le système de Ptolémée, système établit durant l'Antiquité, Vénus suivrait la Terre, à l'instar des autres planètes. Ce système a été avéré pendant très longtemps et s'est trouvé aboli pour els scientifiques seulement quelques années avant par le système de Copernic appelé héliocentrique selon lequel toutes les planètes, même la Terre tournent autour du Soleil, qui lui, est immobile. L'acceptation de ce nouveau système, contraire à la pensée religieuse selon laquelle les planètes, même le Soleil tournent autour de la Terre, création de Dieu, a mis près d'un siècle à se faire. En effet, la révolution copernicienne a commencé au XVIe siècle et ce système est officiellement condamné par l'Eglise en 1616.

Comment Galilée a-t-il montré que Venus ne suivait pas la Terre ? Ou, comment Galilée a-t-il fournit une preuve de plus à la véracité du système héliocentrique ?

Il procède par l'absurde, en supposant que le système géocentrique est avéré. Ainsi, Venus serait sur la première orbe (*surface circonscrite pas l'orbite d'un astre*), suivie de celle du Soleil. Donc, le Soleil étant situé au-delà de l'orbe de Venus, on n'observerait qu'un croissant tout au long de la période de la jumelle de la Terre, elle ne pourrait alors jamais être illuminée entièrement, même lorsqu'elle présente son plus grand diamètre. Or, les observations de Galilée nous montrent un phénomène contraire, puisqu'il voit un petit globe, illuminé à 81%.
De plus, le croissant de Lune est toujours éclairé par le Soleil et orienté vers lui, et celle-ci se déplace autour de la Terre qui elle-même se déplace autour du Soleil. Il est clair dans ce cas que Vénus ayant le même type de phase que la Lune, elle tourne autour du Soleil.
Donc, de deux manières différentes, Galilée a montré que l'unique solution pour voir Venus totalement illuminée est d'avoir le Soleil au centre de son mouvement, ce qui implique qu'elle ne tourne pas autour de la Terre, mais autour du Soleil.



En concluant de ses observations que Venus tourne autour du Soleil, et en réaffirmant sa croyance en le système héliocentrique de Copernic, Galilée donne une raison de plus à l'Église italienne de le condamner plus tard, pourtant ses croquis de Venus sont publiés en décembre 1910 et sa théorie est confirmée officiellement par le collège romain en 1611.

C. Calculs complémentaires

Le travail de Galilée quant à Venus s'arrête à la découverte de ses phases, mais il nous est pourtant possible de calculer la vitesse de Venus dans le référentiel héliocentrique, sa vitesse relative par rapport à la Terre par exemple et d'avoir des modélisations très précises de la position de Vénus dans le ciel.

Comme tous les satellites, Venus a une trajectoire elliptique dont le Soleil est l'un des foyer, mais on peut assimiler sa trajectoire à une trajectoire circulaire étant donné que son excentricité vaut 0,0067 ce qui est très proche de 0.

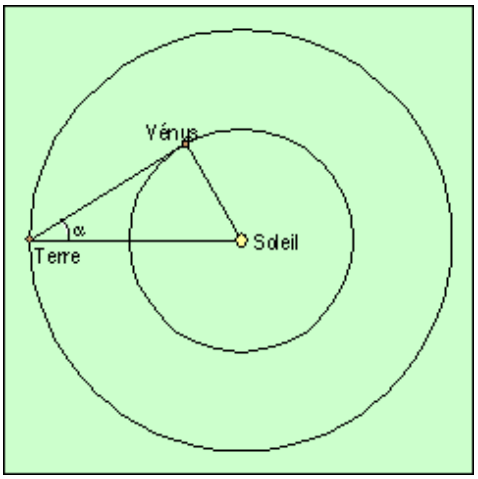
Calculons sa vitesse par rapport au Soleil.

On a :

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

Et :

- R : distance Venus-Soleil = 105. 10^9 m
- G = 6,67. 10^{-11} USS
- m : masse du soleil = 1,98. 10^{30} kg



Calculons R soit la distance Venus-Soleil par la méthode de Aristarque de Samos du IIIe siècle avant Jesus Christ .
Au moment où Venus est à son élongation maximum, on peut mesurer l'angle qui la sépare du Soleil, car on remarque que la droite joignant Venus au Soleil est tangente à l'orbite de Venus. Par conséquent, elle est perpendiculaire au rayon joignant Venus au Soleil, dons le triangle que forment la Terre, le Soleil et Venus est rectangle en Venus.

D'où : $\sin\alpha = R/ST$

$R = ST\sin\alpha$

Or, Copernic remarque que cet angle maximum était de 46°, donc on a :

R=0,7ST

La distance ST représente la distance Terre-Soleil, qui vaut 1UA, soit 150 millions de km, d'où :

R=150x0,7

R=105 millions de km

Avec cette donnée, on peut calculer la vitesse de rotation de Venus autour du Soleil, on a donc :

$$V = \sqrt{\frac{6{,}67\,.10^{-11} \times 1.98\,.10^{30}}{105\,.10^{9}}}$$

V = 35.6km/s

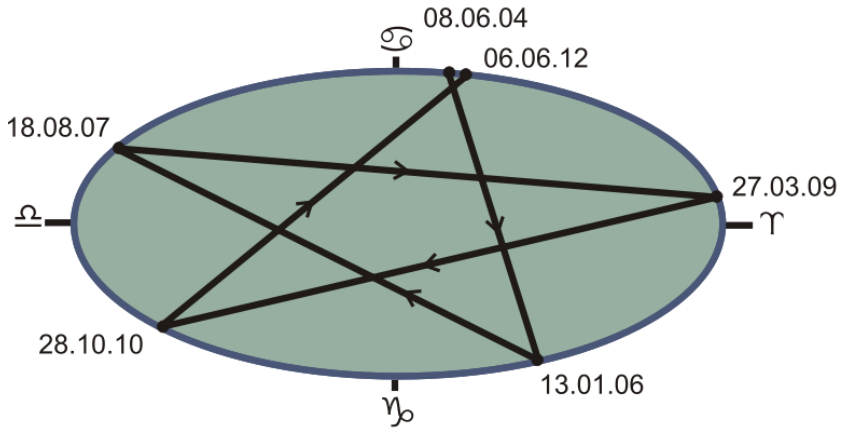
De plus, comme la vitesse de la Terre vaut 29,8 km/s, la vitesse de Venus est **19%** de fois supérieur à celle de la Terre. La vitesse relative entre ces deux planètes est donc de :

Vrel = Vv-Vt

=35,6-29,8

Vrel=5,8km/s.

On peut aussi remarquer que vu de la Terre, les positions successives de Vénus forment approximativement un pentagramme autour du Soleil, tous les 8 ans, trajectoire facilement modélisable avec les techniques modernes. On obtient alors la figure ci-dessous



Galilée, en 1610 , a donc découvert les phases de Vénus, étoile du berger, ou sœur jumelle de notre planète. Cette découverte mena à une réaffirmation de la thèse de l'héliocentrisme. Cet illustre astronome a mis en évidence le fait que Vénus est une planète inférieure qui tourne autour du soleil et présente des phases comme la lune : un large croissant entre la conjonction et la quadrature, son premier ou dernier quartier au moment des élongations Est et Ouest, une forme gibbeuse entre la quadrature et la nouvelle Vénus ou enfin son disque très petit et totalement illuminé lorsqu'elle est en opposition.

Ce qui fait l'importance de ces résultats c'est que malgré la précarité de la lunette utilisée par Galilée, qui fut la première, ils s'avèrent tous être justes.

Photo de Venus entre la conjonction et la quadrature.

4 – Les tâches du Soleil

De tous temps, le Soleil a fasciné les hommes et apparaissait comme une sphère parfaite. Ainsi, Galilée a choisi de pointer sa lunette vers cet astre afin d'en découvrir des caractéristiques jusque là inconnues. C'est en l'étudiant par projection qu'il a pu observer la présence de points sombres sur la surface de l'étoile qu'il considéra comme étant des taches solaires. Cependant, un scientifique allemand défendait au même moment une thèse selon laquelle il s'agirait en fait de satellites du Soleil. Les deux hommes n'ont cessé de se quereller au long de leur carrière, mais d'autres études ont très rapidement plaidé en faveur de Galilée.

A. L'observation par projection

Tout d'abord, expliquons le principe de l'observation par projection. En effet, il serait dangereux d'observer le soleil à l'œil nu de façon prolongée et encore plus nocif de le faire à travers un objet grossissant. Ainsi, une technique relativement simple mais très efficace est utilisée.

Il s'agit de pointer avec l'instrument le Soleil de sorte à ce qu'il soit dans l'axe de la lunette (ou du télescope voire de la paire de jumelles) et de placer derrière l'oculaire un écran sur lequel sera projeté l'image de l'étoile. Ainsi, plus l'écran sera loin, plus l'image sera grande mais moins les contrastes seront visibles. Il faut alors trouver un bon équilibre.

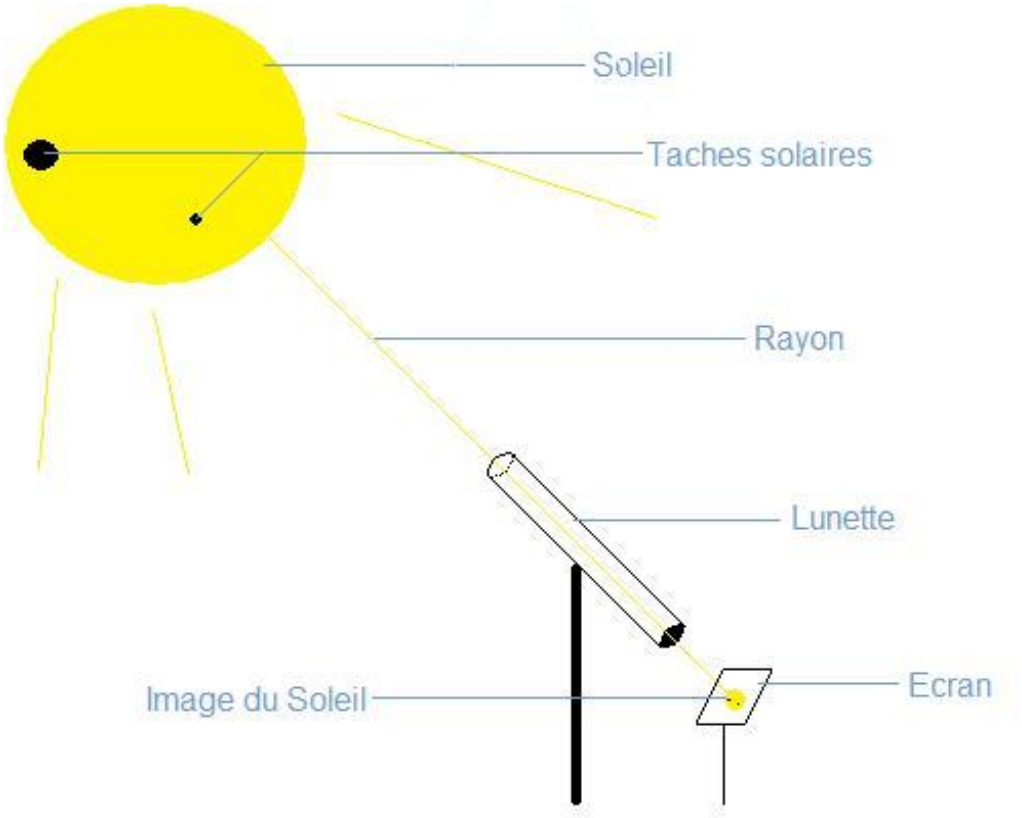


Schéma d'une observation du Soleil par projection.

Cette façon de procéder possède de nombreux avantages : tout d'abord sa praticité. En effet, il est très aisé de la mettre en pratique et elle est accessible au grand public d'autant plus qu'elle ne nécessite pas de matériel perfectionné. Ensuite, bien qu'aujourd'hui nous puissions construire des instruments d'optique adaptés à l'observation d'astres comme le Soleil, la projection reste favorisée par les scientifiques. De tels outils impliquent un entretien permanent et sont très coûteux, d'autant plus qu'il faut changer les filtres régulièrement, l'observation par projection apparaît donc comme plus sûre. Enfin, c'est la seule méthode permettant de dessiner rapidement les taches solaires avec beaucoup de précision.

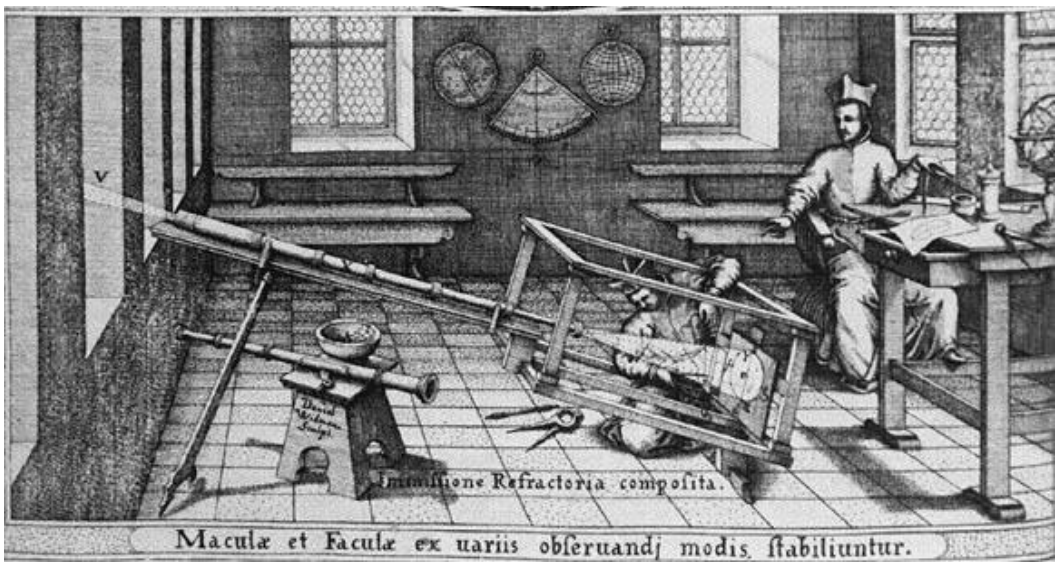
De cette façon, l'idée répandue selon laquelle les astronomes ne travaillent que la nuit est absolument fausse et les observations diurnes sont souvent très belles et ne nécessite pas toujours un ciel totalement clair et une luminosité importante.

B. Querelle entre Scheiner et Galilée

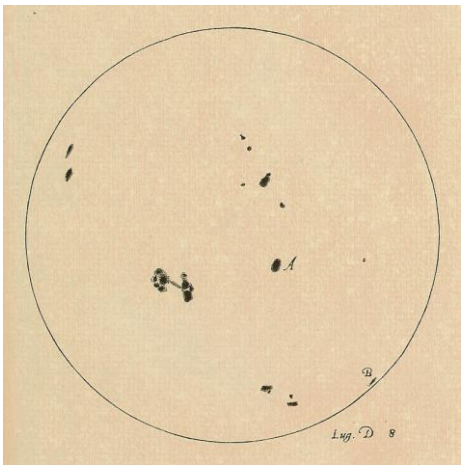
Signe de l'effervescence des esprits dans les années 1610, les taches solaires sont simultanément observées par Kepler, par Scheiner à Ingolstadt en Bavière, par Fabricius à Wittemberg, par Thomas Harriot à Oxford, et par Galilée qui en revendique la découverte dans son *Istoria e Dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti (Histoires et démonstrations à propos des taches solaires)*, de 1613. Cependant, ce sera entre le jésuite allemand Christoph Scheiner et l'italien Galilée qu'une importante querelle va éclater afin de savoir à qui attribuer la paternité de cette découverte.

Ainsi Scheiner, après avoir lu la *Dioptrique* de Képler pu se constituer une lunette et commencer à observer le ciel. Tout d'abord, il étudia le Soleil à l'oeil nu, puis, devant les dangers que cela représentait, il se fabriqua un « hélioscope » reprenant le principe de projection. Il aperçut pour la première fois ces taches le 21 mars 1611, mais la plus grande partie de son étude se fit à partir d'octobre 1611. Entretenant une correspondance avec Markus Welser, conseiller d'Augsbourg, ce dernier publia les trois lettres du scientifique le 5 janvier 1612 (*Tres epistolæ de maculis solaribus* [*Trois lettres à propos des taches solaires*]) assurant que Scheiner était le premier à les observer. La réaction de Galilée fut immédiate. Il affirma avoir observé ce phénomène dès janvier 1610 et revendiqua donc sa priorité sur Scheiner. Ainsi, ces deux pionniers de l'étude du Soleil ne cessèrent de s'affronter jusqu'à la fin de leur vie à ce propos.

Scheiner et son élève, Jean-Baptiste Cysat, dans leur observatoire situé en haut de la Heilig-Kreuz-Kirche (église de la Sainte Croix) d'Ingolstadt, observant le Soleil à l'aide de leur hélioscope.



Enfin, en 1624, alors que Scheiner était en voyage à Rome, il lut *Saggiatore* de Galilée (1623) dans lequel il accuse l'astronome allemand de plagiat. Afin de sauver son honneur, mais surtout persuadé que les accusations de Galilée étaient infondées, Scheiner publia immédiatement *Rosa Ursina sive Sol*, livre dans lequel il décrit le mouvement des taches solaires sur un an, calcule la période de rotation de l'astre et l'inclinaison de son axe. En réponse à cet affront, Galilée publia en 1632 son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde (Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo)* . Cependant, il n'eut pas le temps de se défendre plus longtemps. En effet, son procès pour hérésie s'ouvrit en 1633 et il dut abjurer le 22 juin 1633.



Dessin des taches solaires par Galilée

Certains historiographes pensent que Christoph Scheiner aurait joué un rôle important dans la condamnation de Galilée. Par ailleurs, on peut trouver des tentatives de conciliation entre ces deux grands hommes : P. Gassendi (ami de Scheiner) écrivit ainsi à T. Campanella (philosophe proche de Galilée) : « *Comme il serait heureux que tu emploies ta connaissance des hommes et ta prudence à aplanir la querelle entre ces deux hommes! Car tous deux sont bienfaisants, recherchent la vérité, sont honorables et de bonne foi. Tous deux se sont mutuellement insultés. Et je ne peux que plaindre le destin des savants lorsque je vois comment de grands esprits peuvent s'abaisser à de telles chamailleries. Car de petits esprits, avides d'un mérite qui ne tient qu'à un fil de soie, peuvent bien se quereller ; mais que des hommes si prodigieux mus par l'amour de la vérité se laissent ainsi submerger par la passion, est tout-à-fait curieux.* » (mai 1633). En effet, si les deux physiciens ne s'étaient pas querellés pour une affaire, qui finalement, apparaît aujourd'hui enfantine, ils auraient sûrement pu allier leur génie respectif et faire des découvertes spectaculaires, bien que les travaux de Galilée ont, à l'époque, révolutionné la vision du monde.

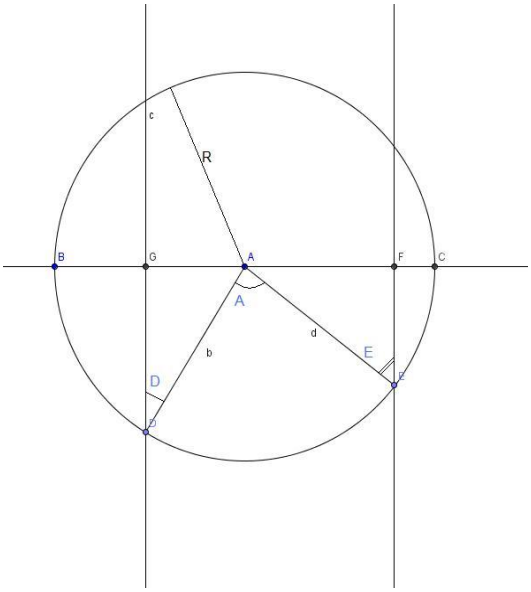
C. Conséquences de cette découverte sur les esprits et sur l'avancée de l'astronomie.

Scheiner était au départ profondément marqué par l'influence de l'Eglise. Ainsi, devant l'observation de ces « taches » noires à la surface du Soleil, il émit une première hypothèse qu'il réfuta par la suite : il s'agirait, en fait, de satellites du Soleil, qu'il appellera « lunes ». Il convient également de mentionner que Peter Busäus, son supérieur, ordonna au jésuite de défendre cette thèse. En effet, l'Eglise catholique perdait alors de l'influence à cette époque, marquée par la Réforme protestante. Ainsi, en acceptant la remise en question de la vision aristotélicienne du monde, ce serait par là même accepter qu'elle n'est pas omnisciente, et pourquoi croirait-on en une institution qui répand une idée alors qu'elle est fausse ? Cependant, continuant ses études, l'astronome comprit vite qu'il s'agissait bel et bien de taches.

Ainsi, il a rejoint l'hypothèse de Galilée. Ce dernier a été le premier à supposer que ces taches appartiennent au Soleil et ne sont en fait pas des lunes solaires ou bien des planètes intérieures comme Vénus ou Mercure. Ces taches semblent apparaître et disparaître de façon aléatoire, certes, mais toutes ont globalement le même mouvement : elles se déplacent parallèlement à l'équateur du Soleil, ce qui prouve que cet astre tourne sur lui-même. Galilée a alors pu estimer sa période de rotation.

(*Nous n'avons pas trouvé les valeurs exactes avec lesquelles il l'a calculée, c'est pourquoi nous expliquons ici simplement sa méthode de calcul.)*

On suppose qu'une tache observée en D se trouve, au bout de x jours en E.



En mesurant les distances BG et FC, on a :
AG = R – BG et AF = R – FC

d'où :

$$\sin D = \frac{AG}{R} \qquad \sin E = \frac{AF}{R}$$

soit : $D = \arcsin\frac{AG}{R}$ $E = \arcsin\frac{AF}{R}$

Or : A = D + E ainsi, le Soleil tourne d'un angle A en x jours.

D'où :

$$\frac{A}{x} = \frac{360}{T}$$

où T est la période de rotation et 360 représente un tour complet du Soleil sur lui-même.

Il en résulte que :

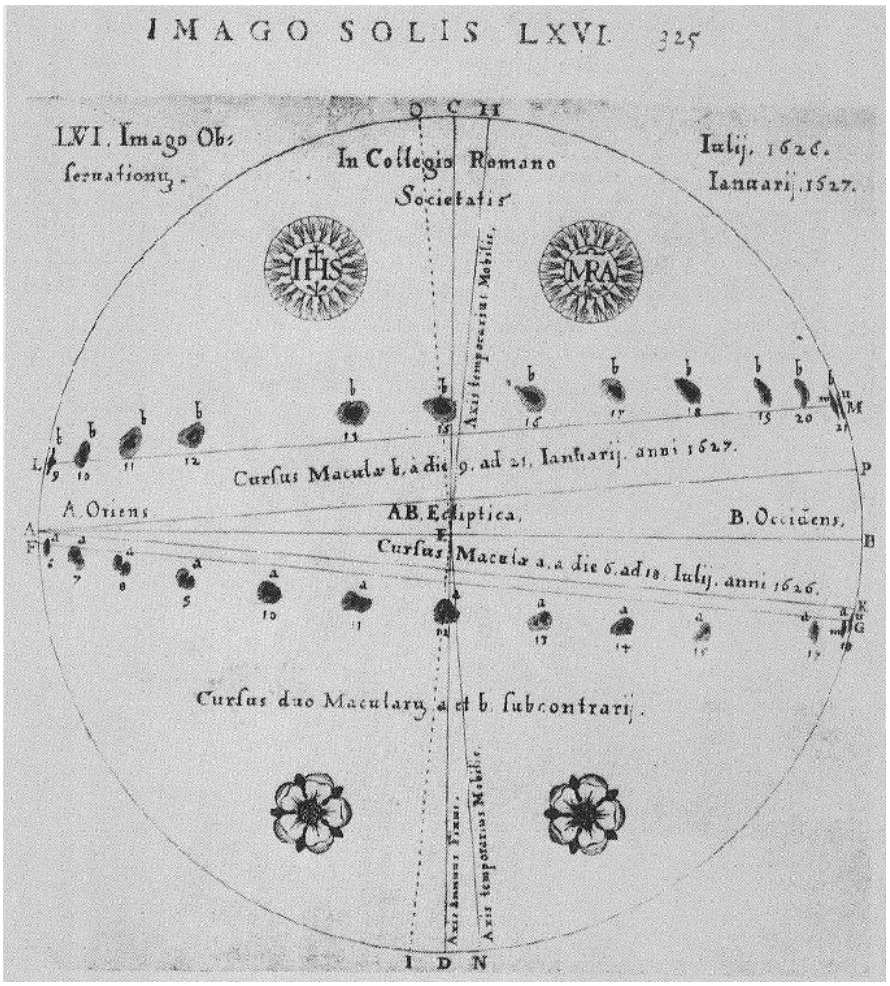
$$T = \frac{360\ x}{A}$$

Ainsi, Galilée a trouvé une période de rotation allant de 26 à 31 jours. Il a également remarqué que cette période variait surtout en fonction de la position des taches à la surface du Soleil. Cette remarque sera confirmée plus tard, avec des outils plus perfectionnés : la période de révolution du Soleil est beaucoup plus faible à l'Equateur qu'aux pôles :

- à une latitude de 0°, c'est-à-dire sur l'Equateur, cette période est de 24 jours
- à une latitude de 30°, elle est de 28 jours
- à une latitude de 60°, de 30,5 jours
- à une latitude de 75°, elle est de 31,5 jours

La période de révolution moyenne est de 27,28 jours. Les résultats de Galilée étaient donc exacts, ce qui est une prouesse si l'on considère ses outils et surtout l'époque à laquelle il vivait.

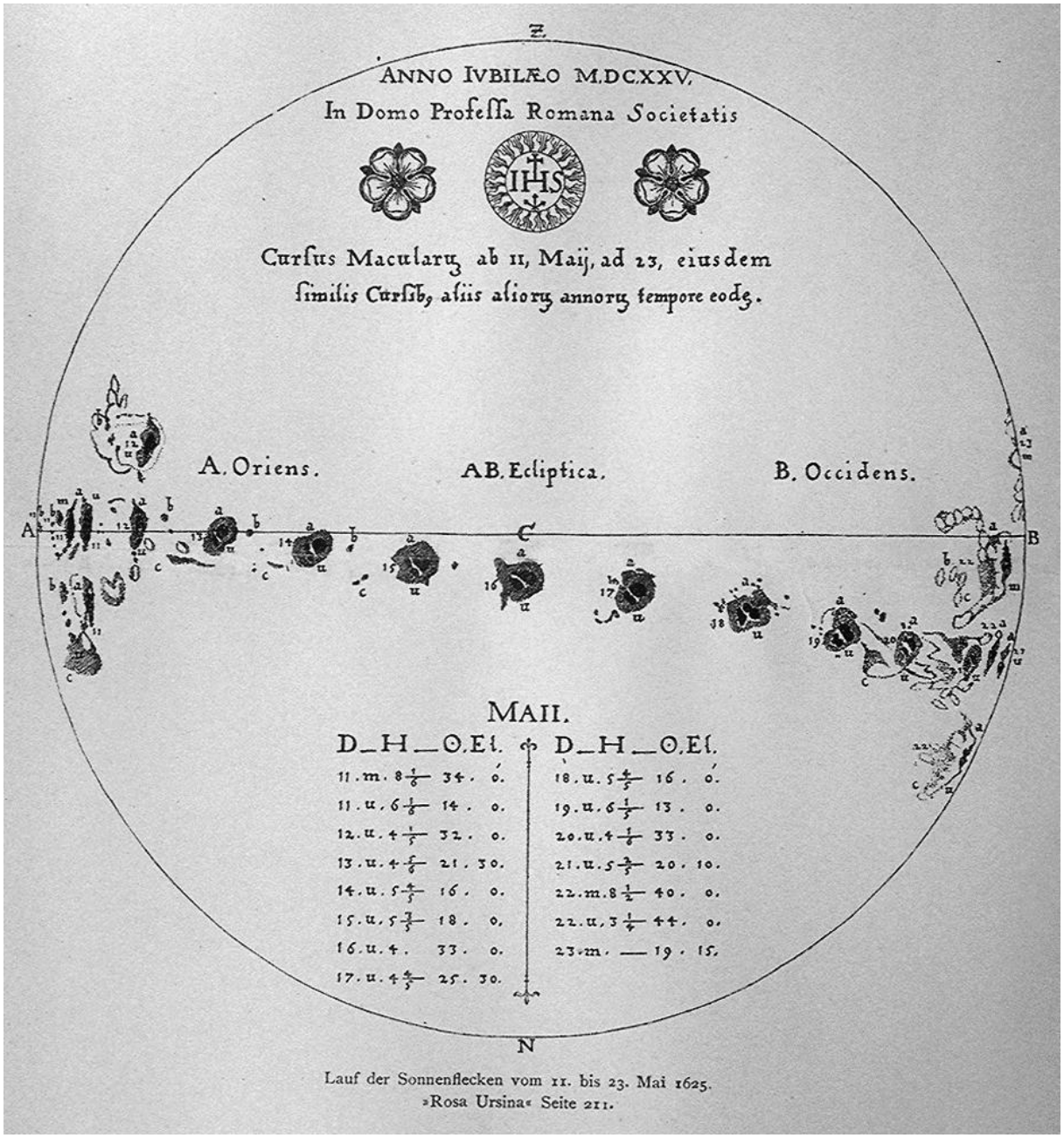
Scheiner, quant à lui, a été un des premiers à affirmer que le Soleil était en rotation autour d'un axe qui n'était pas vertical stricto-sensu. Fabricius avait, avant lui, fait cette observation, mais il est presque certain que l'astronome allemand n'a pas entendu parler de ses recherches. Ainsi, grâce à des observations quotidiennes de ces taches, il a pu en déduire l'inclinaison de l'axe du soleil.



Trajectoires apparentes sur le disque solaire de deux grandes taches observées à six mois d'intervalle, Juin et Décembre 1626, mettant en évidence l'inclinaison du Soleil sur le plan de l'écliptique (extrait de Rosa Ursina).

Ainsi, il a montré que le Soleil tourne autour d'un axe dont l'inclinaison varie selon les saisons (hiver ou été), mais formant un angle de sept degré avec la verticale.
Il estimait par ailleurs la période de révolution de l'astre à 27 jours, chiffre qui, tout comme Galilée, est en accord avec la valeur que nous utilisons aujourd'hui étant données les variations de cette période.

Scheiner fut également le premier à observer quotidiennement les taches solaires, pouvant ainsi suivre leur évolution :


Z
ANNO IVBILÆO M.DC.XXV.
In Domo Professa Romana Societatis
IHS
Cursus Maculary ab 11, Maij, ad 23, eiusdem
similis Cursib, aliis aliory annory tempore eodg.
A. Oriens.
AB. Ecliptica.
B. Occidens.
A
B
C
MAII.
D. H. O. El.
11. m. 8 1/6 — 34. 0.
11. u. 6 1/6 — 14. 0.
12. u. 4 1/5 — 32. 0.
13. u. 4 5/6 — 21. 30.
14. u. 5 4/5 — 16. 0.
15. u. 5 3/5 — 18. 0.
16. u. 4. — 33. 0.
17. u. 4 4/5 — 25. 30.
D. H. O. El.
18. u. 5 4/5 — 16. 0.
19. u. 6 1/5 — 13. 0.
20. u. 4 1/6 — 33. 0.
21. u. 5 3/5 — 20. 10.
22. m. 8 1/2 — 40. 0.
22. u. 3 1/4 — 44. 0.
23. m. — 19. 15.
N
Lauf der Sonnenflecken vom 11. bis 23. Mai 1625.
»Rosa Ursina« Seite 211.

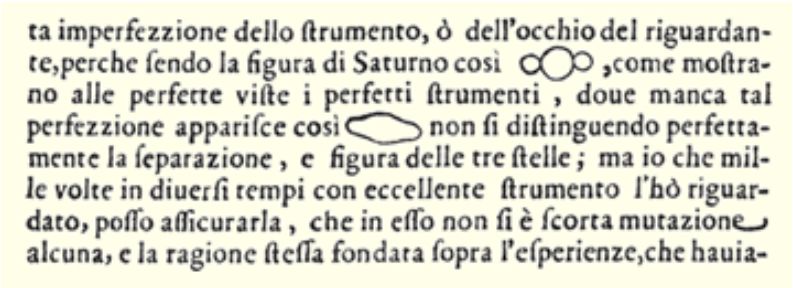
Ainsi, cette étude, répertoriée aujourd'hui parmi les quatre observations majeures de Galilée dans le domaine de l'astronomie a bouleversé le monde de l'époque. En effet, la vision du monde communément admise était que la Terre était au centre du monde et que le Ciel était immuable. Galilée et Scheiner, après Copernic, ont donc remis en question le géocentrisme. La Terre est bien en rotation autour du Soleil et, les taches solaires montrent que ce n'est pas une sphère parfaite. La vision aristotélicienne du monde n'est donc plus valable.

Cependant, aucun des deux astronomes n'a su interpréter ces taches. Il s'agit de points à température faible relativement à la température moyenne du soleil. Il est donc normal, en considérant la modestie de leurs techniques d'observation qu'ils n'aient pu conclure correctement leurs études. On peut, finalement, noter l'ambivalence de Scheiner qui écrira un pamphlet contre la théorie héliocentrique, *Prodromus*, publié de manière posthume en 1651.

5-Saturne, l'erreur de Galilée.

Lettre de Galilée à Julien de Médicis, du 13 Novembre 1610, à la suite de ses observations de Saturne.

« Et voilà que Saturne, à ma très grande admiration, s'est révélé être non pas une étoile seule, mais trois ensemble, qui se touchent presque; elles sont totalement immobiles l'une par rapport à une autre et disposées de cette manière: oOo; celle du milieu est bien plus grande que les latérales, lesquelles sont situées l'une à l'orient et l'autre à l'occident, sur la même ligne droite; elle ne sont pas placées exactement suivant la direction du zodiaque (plan de l'écliptique), mais l'occidentale s'élève un peu vers le nord; peut être sont-elles parallèles au plan de l'équateur. En les observant avec une lunette qui ne soit pas à très fort grossissement, on ne voit pas apparaître trois étoiles bien distinctes, mais il semble que Saturne soit une étoile allongée en forme d'olive[…] mais en se servant d'une lunette qui multiplie plus de mille fois en surface, on aperçoit les trois globe bien distincts, et qui presque se touchent, ne laissant pas entre eux de séparation plus large qu'un mince fil obscur. J'ai donc découvert la cour de Jupiter, et maintenant deux serviteurs pour ce vieillard, qui l'aident à marcher sans jamais s'écarter de lui. »


ta imperfezzione dello ſtrumento, ò dell'occhio del riguardante, perche ſendo la figura di Saturno così ○○○ ,come moſtrano alle perfette viſte i perfetti ſtrumenti , doue manca tal perfezzione appariſce così ⬭ non ſi diſtinguendo perfettamente la ſeparazione , e figura delle tre ſtelle ; ma io che mille volte in diuerſi tempi con eccellente ſtrumento l'hò riguardato, poſſo aſſicurarla , che in eſſo non ſi è ſcorta mutazione alcuna, e la ragione ſteſſa fondata ſopra l'eſperienze,che hauia-

Extrait du texte original de Galilée :
Istoria e Dimostrazioni intorno alle machie solari *(1613)*

Lettre de Galilée à Marco Velseri, en 1612.

« J'ai vu encore Saturne triforme cette année, vers le solstice d'été, puis ayant ensuite cessé de l'observer pendant plus de deux mois, comme quelqu'un qui n'éprouve aucun doute sur sa constance, je suis finalement revenu l'admirer ces jours passés, et je l'ai retrouvé solitaire, sans l'assistance des étoiles habituelles, et, en somme, parfaitement rond et fini comme Jupiter; et tel il se maintient pour l'instant. Or, que peut-on dire devant d'aussi étranges métamorphoses? Peut être les deux étoiles mineures se sont-elles consumées, comme les tache solaires? Peut-être sont elles disparues et brusquement enfouies? Peut être Saturne a-t-il dévoré ses propres fils? Ou peut être était-ce une illusion et fraude, et les lentilles m'ont-elles si longtemps abusé, avec tant d'autres qui, près de moi, les ont plus d'une fois observées?...

Villa delle Selve, 1er décembre 1612,
De votre illustrissime seigneurie le très dévoué Serviteur,
Galiléo Galilei Lincéo. »

Galilée commence à observer Saturne en 1610. Il remarque qu'en utilisant une lunette avec un faible grossissement, on ne peut voir qu'une image en forme d'olive, tandis qu'avec un grossissement de 20 au départ, puis surtout de 30, on peut distinguer deus masses de part et d'autre de Saturne, formant ce que Galilée appellera des « oreilles ». D'où vient le fait que, malgré ses qualités d'observations, les précisions de tous ses résultats, Galilée se soit à ce point trompé et n'ai pas remarqué les anneaux, pourtant visibles à l'aide d'une simple paire de jumelle, de Saturne ? En effet, en se replaçant dans les conditions de Galilée, il faut noter que la science n'était pas encore très performante à cette époque. D'autant plus qu'il s'agit là de l'aube de l'astronomie. Les instruments de Galilée n'étaient donc pas aussi performants que ceux que nous possédons aujourd'hui. Ainsi, aujourd'hui, en défocalisant un peu une lunette astronomique, on passe d'une image précise sur laquelle on observe nettement les anneaux à une image floue présentant trois masses dont une principale au centre, rappelant les descriptions et les dessins de Galilée.

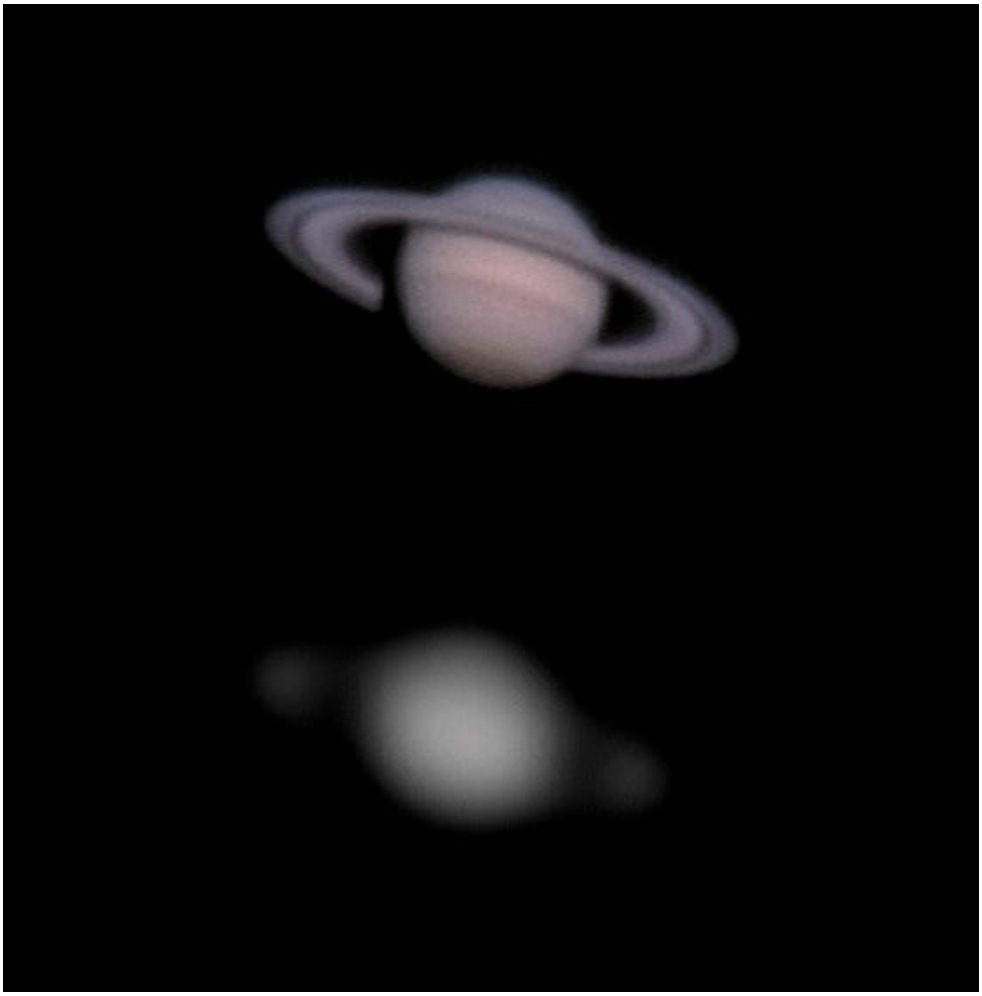


Image nette (à gauche) puis en défocalisant la lunette (à droite)

Galilée va alors comparer ses observations de Saturne à celles qu'il a faites de Jupiter. Devant l'absence de mouvement des « compagnons » de Saturne, il est déconcerté et n'arrive pas bien à interpréter ce phénomène. Il observera Saturne jusqu'en 1612 sans noter de changement et sans trouver d'explication. Pendant deux mois, il n'a pas réitéré ses observations, sans doute n'a-t-il eu que très peu de temps. C'est en juillet 1612 qu'il va alors faire une observation quelque peu troublante : les « oreilles » de Saturne ont disparu. Aujourd'hui nous savons tous que les anneaux de Saturne sont,

périodiquement, visibles par la tranche. Ils sont tellement fins, que, sans un instrument perfectionné, ils sont en fait quasiment invisibles. Galilée va alors émettre plusieurs hypothèses quant à la disparition de ces « boules » sans savoir laquelle privilégier :

- Il va tout d'abord rapprocher cette observation de celle des taches solaires : les « lunes » de Saturne apparaitraient et disparaitraient de façon aléatoire imitant alors les taches solaires.

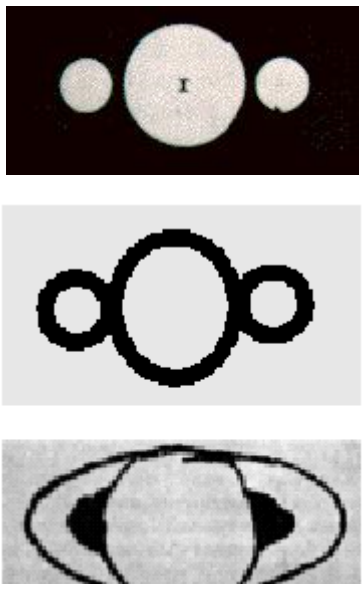
- Il pense également que les « satellites » de Saturne ont pu disparaître brutalement ou alors sont tombés sur la planète. Cependant, il ne sait pas explique ce qui serait à l'origine de ce phénomène.

Il est aujourd'hui amusant de lire le lien qu'a fait Galilée entre la planète Saturne et le dieu latin Saturne. En effet, Saturne (Cronos en grec) était le fils de Gaïa et d'Ouranos (Uranus en latin). Cronos épousa sa sœur Rhéa et, ayant peur de se faire détrôner par l'un de ses enfants, les mangea tous à leur naissance. Cependant, Rhéa, avec l'aide de sa mère réussi à cacher Zeus (Jupiter en latin) qui sauva par la suite ses frères et sœurs.

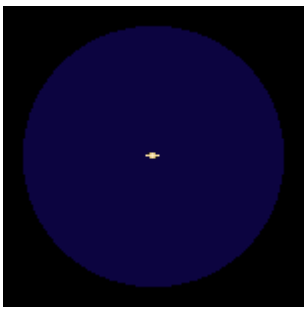
Galilée accusa également ses outils et reprocha à sa lunette de n'être pas assez performante pour expliquer la disparition des « oreilles » de Saturne.

L'astronome italien délaissa donc Saturne pendant longtemps ne sachant pas que les deux masses allaient réapparaître. Cependant, il ne cessa de croire que ces deux « boules » allaient tôt ou tard revenir et qu'elles n'étaient en fait que cachées par Saturne. C'est ainsi qu'en 1613, il pu voir de nouveau les deux astres de part et d'autre de la planète. C'est en 1616 qu'il observe des « triangles » noirs sur une forme ovale ressemblant à une olive. Il ne fit, après cela, plus de nouvelles découvertes sur Saturne.

Comment, après cette observation de triangles noirs, Galilée n'a-t-il pas pensé à des anneaux ? Dans la pensée du XVIIème siècle, déjà l'existence de satellites autour d'autres astres que la Terre est impossible, à l'exception des scientifiques et des plus instruits. De plus, ayant étudié les satellites de Jupiter, il était naturel que le physicien essaie d'expliquer ce phénomène par quelque chose qu'il connaissait déjà bien. Ainsi, bien que devant les descriptions de Galilée, qu'il n'ait pas su interpréter correctement les « oreilles » de Saturne nous paraît impensable, il faut s'imaginer vivant à l'époque du scientifique, époque où l'astronomie commençait à devenir réellement une science et non plus seulement une superstition, époque où nous ignorions tout de notre système solaire.



Dessins de Galilée à la suite de ses observations de Saturne.



Reconstitution de l'image de Saturne telle que Galilée l'observait avec un grossissement X 20.

Finalement, en 1640, Galilée résume dans une lettre à Benedetto Castelli, son élève, toutes ses observations de Saturne. Il explique également qu'il aurait eu besoin d'une lunette plus précise avec un grossissement plus important. De plus, il se montre conscient de l'inexactitude de ses interprétations et que l'énigme de Saturne est loin d'être résolue. En même temps, que serait aujourd'hui la science si Galilée avait déjà tout découvert ? Il faudra attendre 1659 pour que Huygens découvre la véritable nature de ces anneaux.

CONCLUSION

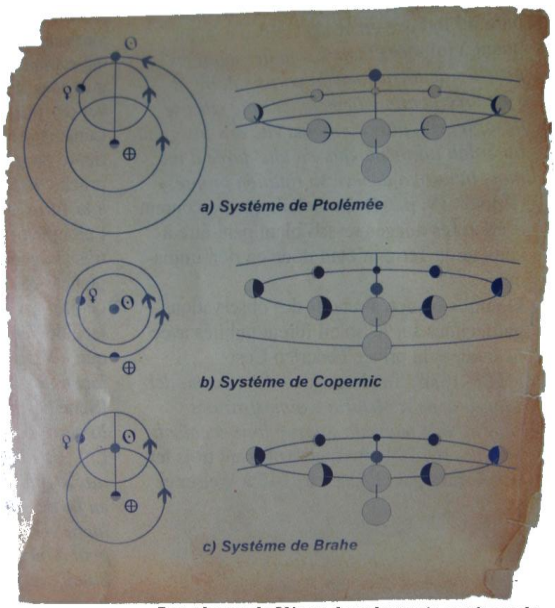
"La gloire de Galilée repose surtout sur des découvertes qu'il n'a jamais faites et sur des exploits qu'il n'a jamais accomplis. Contrairement aux affirmations de nombreux manuels, même récents, d'histoire des sciences, Galilée n'a pas inventé le télescope. Ni le microscope. Ni le thermomètre. Ni l'horloge à balancier. Il n'a pas découvert la loi d'inertie ; ni les taches du soleil. Il n'a apporté aucune contribution à l'astronomie théorique. Il n'a pas laissé tomber de poids du haut de la tour de Pise ; et il n'a pas démontré la vérité du système de Copernic. Il n'a pas été torturé par l'Inquisition, ni excommunié, il n'a pas dit "Eppur si muove" ; il n'a pas été un martyr de la science."

-Arthur Koestler, Prix Nobel, *Les somnanbules*(1963)

Galilée ne songea jamais à élaborer un système du Monde qui lui soit propre. Mais, en un laps de temps très réduit, il a réussi à découvrir et à démontrer des théories qui ont révolutionné le monde.

Certaines découvertes, comme l'imperfection de la surface lunaire ou encore la présence de tâches sur le Soleil, lui ont permis de montrer que les objets célestes ne sont pas incorruptibles. Grâce à la découverte des phases de Vénus, similaire aux phases de la Lune, il a prouvé qu'il n'y a pas de différence de nature entre la Terre et les corps célestes, et, principalement, que Vénus est une planète intérieure qui tourne autour du Soleil. Cette théorie est confirmée par la découverte de quatre satellites de Jupiter : seul le système héliocentrique peut intégrer de nouveaux astres tout en maintenant un ordre universel cohérent.

Personne n'avait jamais trouvé une preuve réelle permettant de faire le choix entre les conceptions géocentrique et héliocentrique du monde. Jusqu'à Galilée et sa nouvelle méthode d'observation, personne ne pensait qu'on puisse en trouver.
L'apparition de la figure nouvelle de l'astronome philosophe, inventeur de la lunette astronomique marque un tournant dans l'histoire de toute l'humanité. Maintenant, 400 ans plus tard, Galilée reste l'homme, qui a réussi à bouleverser l'astronomie, qu'il ait fait toutes ces expériences ou non. Nous ne célébrons pas seulement un Homme, mais une époque qui a changé le courant de l'humanité.



Les phases de Vénus dans les trois systèmes du monde les plus répandus à l'époque des découvertes de Galilée :
A - Ptolémée ; B - Copernic ; C - Tycho Brahe

Bibliographie

- *Sidereus Nuncius , le messager céleste* de Galileo Galilei , 1610
- *Rosa Ursina* de Scheiner, Bracciano, 1626-1630
- *Que sais-je? Galilée* de Georges Minois aux éditions Presses Universitaires, 2000
- *Que sais-je ?Histoire de la physique* de Robert Locquenaux aux éditions *Presses Universitaires, 1987*
- *L'ABCdaire du Ciel* édité par Flammarion, 1998
- *Lune : la biographie autorisée* de David Whitehouse traduit par C.Frankel, aux éditions Dunaud, 2008
- *Atlas de la Lune* de Antonin Rükl aux éditions Gründ, 1993
- O*bserver le ciel en ville* de Denis Berthier, aux éditions multiguides Larousse, 2004
- *Lunettes et télescopes, mode d'emploi* de Jean Lacroux et Denis Berthieraux éditions multiguide astronomie Bordas, 2000
- O*bserver le ciel à l'œil nu et aux jumelles* de Pierre Bourge et Jean Lacroux aux éditions multiguides Larousse, 2004
- Revue *l'Astronomie,* 20ème numéro
- *Etudes Galiléennes* de Alexandre Koyré aux éditions Herman, histoire de la pensée, 1986
-cours de Jean-Marie Malherbe, observatoire de paris, décembre 2008 : *Quel héritage le XVIIème siècle nous a-t-il laissé en physique du soleil ?*

Sites consultés :

sites de berry college et university of oklahoma
*.maths.ac-creteil.fr/sources/fichiers_pdf/astro-**hauteur-montagne-luna**ire*
www.espace-sciences.org/.../com.univ.collaboratif.utils.LectureFichiergw
http://www.astrosurf.com/luxorion/galilee-hommage3.htm
http://www.aim.univ-paris7.fr/CHARNOZ/homepage/GRAVITATION/grav4.html
http://www.canalacademie.com/Les-observations-de-Galilee-Venus.html
www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/sidereus/sidereus_p160-192.pdf+venus+et+galilée
www.sceptiques.qc.ca/assets/docs/qs53p22.pdf+venus+et+galilée&h
http://www.ac-nice.fr/clea/MercureVenus/venus1.htm
http://www.dil.univ-mrs.fr/~gispert/enseignement/astronomie/1ere_partie/distances.php